

EXOPLAN – Web-basiertes Planungswerkzeug für Kläranlagen in warmen und kalten Klimaten

Jens Alex (Magdeburg), Nils-Kristof Kabisch, Maike Beier (Hannover), Tito Gehring (Bochum) und Tim Fuhrmann (Essen)

Zusammenfassung

Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt EXOPLAN wurden Softwaretools für Kläranlagenplanungen im Ausland entwickelt, die kostenfrei als Web-Anwendung im Internet sowie in neuen Fassungen der Simulationssoftware SIMBA[#] bereitgestellt werden. Die Softwaretools basieren auf dem im Oktober 2016 erstmals veröffentlichten DWA-Themenband T4/2016 „Bemessung von Kläranlagen in warmen und kalten Klimazonen“, in dem international anwendbare Bemessungsansätze für Kläranlagen beschrieben sind. Zusätzlich wurden in den Tools Berechnungen von Kosten und CO₂-Äquivalenten zur Bewertung der Anlagen implementiert. Das Web-basierte EXOPLAN-Planungswerkzeug ist dabei nicht nur für die Anwender, sondern auch für Entwickler weiterer Verfahrensmodule offen.

Schlagwörter: Digitalisierung, Abwasserreinigung, Bemessung, Verfahren, Vergleich, CO₂-Fußabdruck, Kläranlage, Kosten, Software

DOI: 10.3242/kae2021.02.004

Abstract

EXOPLAN – A web-based planning tool for wastewater treatment plants in warm or cold climates

The EXOPLAN project, which was funded by the German Federal Ministry for Education and Research, developed software tools for planning wastewater treatment plants outside Germany. These tools are provided free of charge online as a web application and in new versions of the SIMBA[#] simulation software. The software tools are based on DWA volume T4/2016 Design of Wastewater Treatment Plants in Warm and Cold Climate Zones, which describes design approaches for wastewater treatment plants that can be used internationally. The tools also implemented calculations of costs and CO₂ equivalents to evaluate plants. EXOPLAN, a web-based planning tool, is not only open to users, but also developers or other process modules.

Key Words: digitisation, wastewater treatment, design, process, comparison, CO₂ footprint, wastewater treatment plant, costs, software

1 Einleitung

Mit dem DWA-Themenband T4/2016 „Bemessung von Kläranlagen in warmen und kalten Klimazonen“ [1] hat die DWA weltweit anwendbare Bemessungsansätze für Kläranlagen veröffentlicht, die im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Vorhaben EXPOVAL [2] erarbeitet worden sind. Im Folgeprojekt EXOPLAN wurden die Bemessungsansätze in anwendungsorientierte Planungswerkzeuge für Belebungsanlagen, Tropfkörper, Anaerobanlagen, Teichanlagen, Schlammfäulung und solare Klärschlamm-trocknung umgesetzt.

Damit liegt ein Beispiel für die Digitalisierung der Planungsprozesse für Abwassersysteme mit modernen Web-basierten Ansätzen vor. Es wird ein komfortables, frei zugängliches Werkzeug für Planer von Kläranlagen bereitgestellt.

Die Nutzung kann zum einen als Web-Anwendung („Web-App“) und zum anderen über Modellblöcke in der Simulationssoftware SIMBA[#] erfolgen. Die Web-Applikation ist unter der Adresse <http://iservice.ifak.eu/expoplan> mit dem Nutzernamen

„expo“ und dem Passwort „plan“ öffentlich und kostenfrei zugänglich.

Zur Entwicklung der Web-Applikation wurde eine Methodik zugrunde gelegt,

- die es Abwasserexperten ohne weitergehende Programmierkenntnisse ermöglicht, beliebige Bemessungsvorschriften für Verfahrensstufen, Kostenabschätzungen und CO_{2,eq}-Emissionen in standardisierter digitaler Form zu formulieren.
- diese Berechnungen lokal und im Zusammenspiel mit der Simulationssoftware SIMBA[#] einzusetzen.
- diese Berechnungen auf einer öffentlich zugänglichen oder einer eingeschränkt zugänglichen Webseite im Sinne eines digitalen Dienstes auszuführen.

Als Voraussetzung für die Entwicklung des digitalen Planungswerkzeuges mussten die in textlicher Form als DWA-Themen-

band T4/2016 vorliegenden Bemessungsvorschriften so aufbereitet werden, dass sich Verfahrensstufen verketteten lassen. Diese Ergänzungen sind im Abschnitt „2.1 Definition eines durchgängigen Daten-Vektors“ dieses Beitrags erläutert. Als zusätzliches Ziel wurden in dem Werkzeug neben der verfahrenstechnischen Dimensionierung eine vereinfachte Kostenabschätzung, eine Energieverbrauchsrechnung sowie die Berechnung eines „CO₂-Fußabdrucks“ integriert. Die hierzu entwickelte Methodik wird im Abschnitt „3 Berechnung von Kostenkennwerten und CO_{2,eq}-Emissionen“ vorgestellt. Die technische Umsetzung in ein durch Abwasserexperten pflegbares und erweiterbares digitales Planungswerkzeug wird im Abschnitt „4 Umsetzung in ein digitales Werkzeug“ beschrieben.

2 Struktur des Planungswerkzeugs

2.1 Definition eines durchgängigen Daten-Vektors

Bei der Planung von Kläranlagen müssen unterschiedliche Verfahren wie mechanische Vorreinigung, mehrstufige biologische Abwasserreinigung und Schlammbehandlungsschritte kombiniert werden. Der DWA-Themenband T4/2016 [1] stellt für die einzelnen Verfahrensstufen Dimensionierungsvorschriften bereit. Bei einer Verkettung der Stufen resultiert der Zulauf einer Stufe aus dem Ablauf der im Fließweg weiter vorn liegenden Stufe. Das heißt, jede Dimensionierungsvorschrift muss nicht nur die erforderliche Größe der Komponenten berechnen, sondern auch den Ablauf der Stufe qualitativ abschätzen, um die Zulaufbedingungen der folgenden Stufen vorzugeben. Mit dem Ziel, aus den einzelnen Stufen komplette Anlagen – also Verfahrensketten – dimensionieren zu können, wurde bereits für die Entwicklung der Bemessungsalgorithmen im Rahmen des EXPOVAL-Projekts ein durchgängiger Stoffvektor definiert, der

Ab- und Zulauf jeder Stufe einheitlich beschreibt (vgl. DWA-Themenband T4/2016, Beispiele in Anhang B). Mit der Überführung in ein professionelles Planungswerkzeug wurde der Vektor weiter ergänzt und an die folgenden Anforderungen angepasst:

- Beschreibung des Abbaus organischer Verbindungen
- Konformität zur Bemessung nach DWA-A 131 [3]
- Kompatibilität zur Nutzung des Werkzeugs dynamische Simulation nach Vorgaben der Hochschulgruppe Simulation, siehe [4, 5]
- Bilanzierung von Erhaltungsgrößen wie CSB, Stickstoff, Phosphor und der Wassermengen
- Beschreibung von typischen Schlammkenngrößen wie TS und oTS
- Beschreibung der Absetzbarkeit
- Vermeidung von Informationsverlust beim Übergang in die nächste Stufe
- Vermeidung doppelter Informationseingabe und
- Berücksichtigung des Vorabbaus durch vorhergehende Stufen.

In Tabelle 1 ist der Aufbau des Vektors („EXPO-Vektor“) dargestellt. Neben den Vektorvariablen können durch die Faktoren i_{CSB} , i_{TS} , i_{oTS} und i_N weitere Stoffgrößen wie CSB, Feststoffgehalt (TS), organische, abbaubare Feststoffe (VSS) und Gesamtstickstoffgehalt berechnet und zwischen den Verfahrensstufen weitergegeben werden.

Die Namen und Bedeutungen der Fraktionen sind an die Welt der Belebtschlammmodellierung und die Zulauffraktionierung nach DWA-A 131 (2016) angelehnt. Zu beachten ist, dass die Stoffgruppe X_S rein physikalisch als partikuläre und damit sedimentierbare organische Fraktion definiert ist, im Unterschied zu Belebtschlammmodellen, wie zum Beispiel dem ASM3, in dem X_S biologisch als schwerabbaubare Fraktion (be-

Variable	Einheit	i_{CSB} [g _{COD} /g]	i_{oTS} [g _{VSS} /g]	i_{TS} [g _{TSS} /g]	i_N [g _N /g]	Beschreibung
S_S	g/m ³	1	0	0	0,03	gelöster abbaubarer CSB (entsprechend $S_{CSB,abb}$ in DWA-A 131)
S_I	g/m ³	1	0	0	0,01	gelöster inerter CSB (entsprechend $S_{CSB,inert}$ in DWA-A 131)
X_S	g/m ³	1	0,625	0,625	0,03	partikulärer abbaubarer CSB (entsprechend $X_{CSB,abb}$ in DWA-A 131)
X_I	g/m ³	1	0,714	0,714	0,04	partikulärer inerter CSB (entsprechend $X_{CSB,inert}$ in DWA-A 131)
X_{MI}	g/m ³	0	0	1	0	partikuläre mineralische Stoffe Inhaltsstoffe (entsprechend $X_{anorgTS}$ in DWA-A 131)
S_{NH}	g/m ³	0	0	0	1	Ammonium- und Ammoniakstickstoff
S_{NO}	g/m ³	0	0	0	1	Nitrat- und Nitritstickstoff
C_P	g/m ³	0	0	0	0	Phosphor gesamt
S_{alk}	mol/m ³	–	–	–	–	Alkalinität, Säurekapazität
θ	°C	–	–	–	–	Abwassertemperatur
TSS ^{*)}	g/m ³	–	–	1	–	gesamte suspendierte Feststoffe
VSS ^{*)}	g/m ³	–	1	–	–	abbaubare suspendierte Feststoffe
Q	m ³ /d	–	–	–	–	Zufluss, Volumenstrom

^{*)} TSS und VSS werden nur als Zustandsvariablen für den Schlammvektor betrachtet.

Tabelle 1: Beschreibung der Zustandsvariablen des EXPO-Vektors

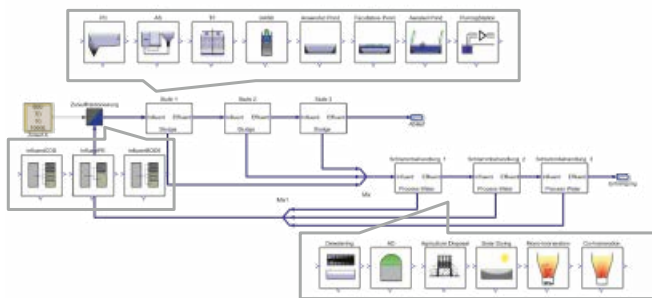


Abb. 1: Generische Verschaltung von Abwasserreinigungsmodulen und Schlammbehandlungsmodulen (hier beispielhaft für die Kopplung von drei Abwasser- und drei Schlammbehandlungsstufen dargestellt)

stehend aus partikulären und kolloidalen Inhaltsstoffen) definiert wird.

2.2 Verkettung der Einzelverfahren – Fließdiagramm

Um auch für die Web-Applikation eine flexible Verschaltung der Verfahrensstufen zu ermöglichen, wurde die in Abbildung 1 dargestellte Abfolge von jeweils frei wählbaren Abwasserreinigungs- und Schlammbehandlungsverfahren je Stufe umgesetzt.

Zunächst wird aus den Zulaufdaten zur Kläranlage ein Abwasserstrom in Form des EXPO-Vektors berechnet (Zulauffraktionierung). Für die Zulauffraktionierung stehen drei Optionen zur Verfügung: eine einfache Vorgabe auf Basis von Einwohnergleichwerten oder differenzierter, basierend auf CSB- oder BSB₅-Zulauffrachten. In diese drei Zulaufmodule wurden Bilanzberechnungen zur Schließung von Datenlücken unter Berücksichtigung typischer Abwassereigenschaften eingebettet. Für die Berechnung mit CSB- und BSB₅-Frachten wurde zusätzlich eine Plausibilitätsprüfung durch den Vergleich der Anzahl der angeschlossenen Einwohner implementiert. Der so berechnete Zulauf-Abwasserstrom wird anschließend durch die ausgewählten Abwasserreinigungs-Verfahrensstufen geleitet. Die zurzeit eingebundenen Verfahrensstufen der Abwasserreinigung sind:

- mechanische Vorbehandlung in einer Vorklärung
- Belebtschlammstufe bestehend aus Belebungsbecken und Nachklärung
- Tropfkörper
- anaerobe Abwasserreinigung als „Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)“-Verfahren
- anaerobe, belüftete und fakultative Teichanlagen
- Abwasserhebewerk (Zulauf- oder Zwischenhebewerk).

In jeder Stufe wird der Schlammanfall berechnet. Die Schlammströme werden additiv gesammelt und als Mischung in die Schlammbehandlung eingebracht. Der der Schlammbehandlung zugeführte Schlamm kann ebenfalls verschiedene Behandlungsstufen durchlaufen. Optionen hierfür sind:

- maschinelle Schlammentwässerung
- anaerobe Schlammfäulung
- landwirtschaftliche Ausbringung
- solare Klärschlamm-trocknung
- Mono-Klärschlammverbrennung
- Mit-Verbrennung.

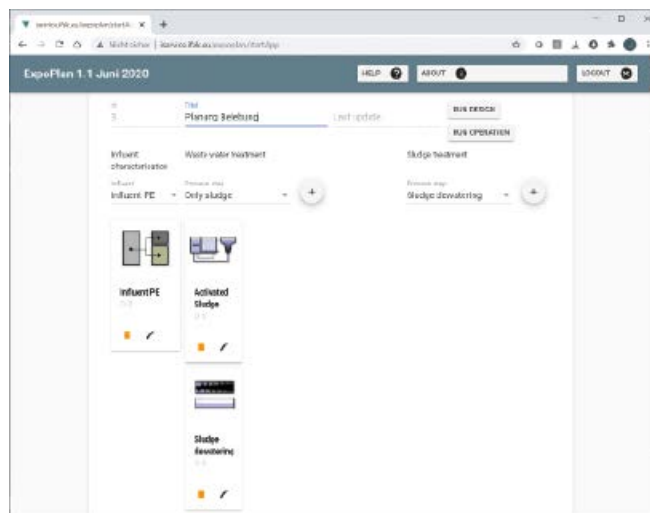


Abb. 2: Grafische Verfahrensverschaltung in der Web-App

In der Schlammschiene wird der Schlammstrom ebenfalls von Verfahrensschritt zu Verfahrensschritt weitergeleitet. In jedem Schritt der Schlammbehandlung kann optional ein Teilstrom (Prozesswasser) anfallen, der analog zum Überschussschlamm der Abwasserbehandlungsverfahren über alle Schritte der Schlammbehandlung gesammelt und optional in die erste Verfahrensstufe der Abwasserbehandlung zurückgeführt werden kann.

In der Web-App wird die gewählte Verschaltung, wie in Abbildung 2 zu sehen, übersichtlich grafisch dargestellt.



MECANA

A Metawater Company



Schlussfiltration – Mikroplastikrückhalt

Vierte Reinigungsstufe – P Elimination

Polstofffiltration ist eine günstige und effiziente Alternative gegenüber der Sandfiltration und Mikrosiebe. Mecana forscht auf diesem Gebiet schon seit 25 Jahren und hat zahlreiche Anlagen weltweit geliefert.

Die Mecana Versuchsanlagen sind dafür konzipiert die Technologie unter realen Bedingungen zu testen um unseren Kunden die maximale Investitionssicherheit zu gewährleisten. Die letzte Generation unserer OptiFiber® eignet sich für die verschiedensten Anwendungen, von Schlussfiltration über Phosphorelimination bis hin zu vierter Reinigungsstufe.




Mecana: kompetente Beratung
kombiniert mit robuster Anlagentechnik!

Mecana Umwelttechnik GmbH
CH-8864 Reichenburg | T +41 55 464 12 00
www.optifibermedia.com
www.mecana.ch | info@mecana.ch

In dem dargestellten Konfigurator können die Zulauffrakti-onierungsmethode ausgewählt, die Stufen zur Abwasserreini-gung an die Verfahrenskette angefügt und die Auswahl der Schlammbehandlungsmodule getroffen werden.

2.3 Berechnungsablauf – Design und Betrieb der Kläranlage

Die so konfigurierte Verfahrens-Verschaltung durchläuft zwei Berechnungsläufe. Im ersten Lauf (Design-Lauf) wird die An-lage Stufe für Stufe dimensioniert unter Verwendung der Bemessungs-last.

In einem zweiten Lauf (Betriebs-Lauf) werden die für die Verfahrensbewertung benötigten Verbräuche und Emissionen unter Ansatz einer mittleren Jahresbelastung abgeschätzt. Für diese Berechnungen werden je Verfahrensstufe weitere Kenn-größen abgefragt, die für die Kosten-, Energie- und $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Berechnungen erforderlich sind (siehe Abschnitt 3.2 und 3.3). Bei der Betriebssimulation von Belebungsanlagen erfolgen diese Berechnungen mit einer Modellanlage unter Verwendung des nach [5] implementierten „Activated Sludge Model No 3“ (ASM3) [6].

3 Berechnung von Kostenkennwerten und $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen

3.1 Methodik der Verfahrensbewertung

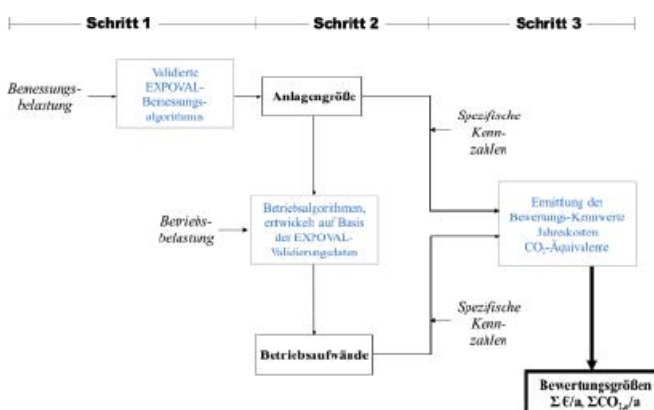
Die Verfahrensbewertung mittels Kennzahlen spielt im Pla-nungsprozess von abwassertechnischen Anlagen eine wesentli-che Rolle, um unterschiedliche Verfahrensvarianten verglei-chen zu können und letztendlich zu einer Vorzugsvariante zu kommen, die den gesetzlichen Anforderungen entspricht und die Wünsche und Bedürfnisse des Betreibers nach zum Beispiel hoher Kosteneffizienz oder geringem Energieverbrauch best-möglich erfüllt. Die zu erfüllende Grundfunktion bzw. der Grundnutzen der zu planenden Anlage ist meistens durch ge-setzliche Vorgaben eindeutig definiert. Bei abwassertechni-schen Anlagen ist dies die sichere Einhaltung einer definierten Reinigungsleistung bezüglich Schmutz- und Nährstoffen. Je-doch können in der Regel unterschiedliche Verfahrensvarianten

diese Grundfunktion in gleicher Qualität erfüllen, sodass wei-tere Bewertungskriterien herangezogen werden müssen, um eine Entscheidung für oder gegen eine bestimmte Verfahrens-variante treffen zu können. Gängige Bewertungskriterien sind dabei zum Beispiel der finanzielle Aufwand (Investitionen und Betriebskosten), der Energiebedarf, der Personalaufwand, Redundanz, Robustheit und/oder die Erweiterbarkeit. Durch den anthropogenen Klimawandel und den damit verbundenen Be-strebungen den Ausstoß von klimaschädlichen Gasen in die At-mosphäre zu vermeiden bzw. zu reduzieren, hat der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Fußabdruck als Bewertungskriterium in den letzten Jahren zu-nehmend an Relevanz gewonnen.

In der mit dem EXPOPLAN-Planungswerkzeug fokussierten frühen Planungsphase sollen die für den weiteren Planungs-prozess infrage kommenden Verfahrensvarianten durch eine vereinfachte Verfahrensbewertung frühzeitig eingegrenzt wer-den und die Möglichkeit geschaffen werden, das Potenzial in-novativer Verfahrensvarianten schnell abschätzen zu können. In Erweiterung zur Anlagendimensionierung werden daher auch Kennzahlen zur Bewertung der Verfahrensvarianten durch das Planungswerkzeug berechnet und für den vereinfachten Vergleich gegenübergestellt. Hierdurch können die Vorzüge klimarelevanter, ressourcenschonender und energe-tisch optimierter Lösungen direkt mit dem Planungswerkzeug zahlenmäßig ermittelt und gegenüber dem Kunden überzeu-gend dargestellt werden. Ein besonderer Vorteil für den Anwender ergibt sich hierbei durch die im Programm vorgese-hene Flexibilität, eigene spezifische Betriebs- und Kosten-kennwerte bei der Berechnung der Kennzahlen verwenden zu können.

Für das EXPOPLAN-Planungswerkzeug wurde die im BMBF-Verbundprojekt E-Klär [7] vom Institut für Siedlungswasser-wirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover (ISAH) entwickelte Methode der modellunterstützten Investitionspla-nung und Bewertung in dem Softwaretool umgesetzt. Das Kon-zept (Abbildung 3) basiert auf der Anlagendimensionierung (Bemessung), gekoppelt mit der Ermittlung der verfahrensspe-zifischen Verbrauchs- und Betriebsgrößen über eine Betriebs-simulation [8]. Durch Multiplikation der Stoff- und Systemgrö-ßen mit spezifischen Kosten-, Leistungs-, Verbrauchs- oder Emissionskennzahlen erfolgt dann die Berechnung der Bewer-tungskennzahlen in Abhängigkeit von der spezifischen Frage-stellung, Verfahrenskette oder fallspezifischen Belastung/Rei-nigungsleistung (Szenarien). Die Bewertungsgrößenberechnung ist dabei über die verfahrensstufenspezifisch ausgewähl-te Bezugsgröße (Haupttreiber der Bewertungsgröße) direkt mit den verschiedenen Szenarienansätzen gekoppelt, sodass beispielsweise Änderungen in der Zulaufbelastung direkt eine Veränderung der Bewertungskennzahl zur Folge haben. Wichtige Voraussetzung der Berechnung ist also, dass die Stoff- oder Systemgröße, von der die Bewertungsgröße maßgeblich ab-hängig ist, korrekt identifiziert und auch durch das Stoffstrom-modell beschrieben und quantifiziert wird.

Die Zahlenwerte der Bewertungskennzahlen werden zu-nächst für jedes Verfahren einzeln berechnet und anschließend für die Verfahrenskette zu aggregierten Bewertungsgrößen auf-summiert. So erfolgt eine Aggregation aller Energiekosten, Be-triebsmittelkosten, Personalkosten und Wartungskosten. Als Darstellungsvarianten wurden Säulen- und Tortendiagramme im EXPOPLAN-Planungswerkzeug integriert (siehe Beispiel einer Kostenanalyse in Abbildung 4). Durch die modulweise Be-



1. Berechnung der Anlagengröße; 2. Berechnung der Betriebsverbräuche und -emissionen; 3. Berechnung der Bewertungskennzahlen durch Multiplikation der Massenzahlen mit spezifischen Bewertungskennzahlen

Abb. 3: Schematische Veranschaulichung der dreistufigen Ermittlung der Bewertungsgrößen

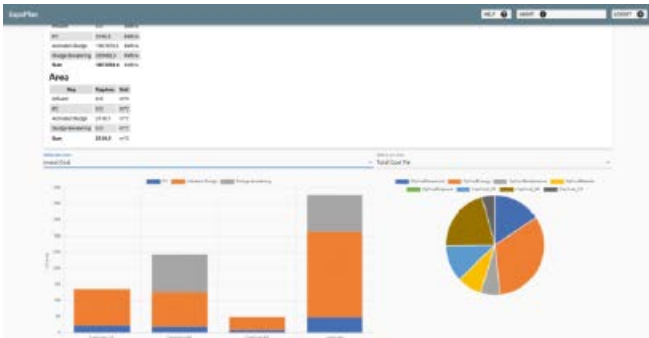


Abb. 4: Beispiel für die grafische Auswertung einer Kostenanalyse

rechnung der Bewertungsgrößen lassen sich neben verschiedenen Verfahrensketten auch Szenarienalternativen einzelner Verfahrensstufen miteinander vergleichen, zum Beispiel um besonders effiziente Betriebsweisen der einzelnen Verfahrensstufen zu identifizieren oder Ausstattungsvarianten gegenüberzustellen.

Im Rahmen der Tool-Erstellung wurden für alle betrachteten Verfahren die zu berücksichtigenden Bewertungsgrößen und ihre Haupttreiber definiert. Weiterhin wurden Standardwerte für spezifische Kennwerte sowie Standard-Kostenkurven verfahrensspezifisch hinterlegt (s. Abschnitt 3.2). Diese dienen dazu, das Konzept zu veranschaulichen und bei der Einarbeitung in das Werkzeug eine schnelle Generierung von Ergebnis-

sen zu ermöglichen. Sie sollten vom Anwender für einen realen Verfahrensvergleich unbedingt individuell unter Berücksichtigung der lokalen Randbedingungen angepasst werden. Die berücksichtigten Kostengrößen basieren im Wesentlichen auf Angaben aus dem DWA-Themenband T4/2016 und wurden stellenweise ergänzt.

Zur Berechnung der CO_{2,eq}-Emissionen wurden die relevanten Größen für die indirekten und direkten CO₂-Emissionen in einem neuen Ansatz zusammengestellt (s. Abschnitt 3.3). Zusätzlich erfolgt eine Berechnung des Flächenbedarfs auf Grundlage des Bemessungsergebnisses (in der Regel das Volumen) und einem vom Anwender anzugebenden Faktor für die Berechnung der hierfür zu berücksichtigende Betriebsfläche.

3.2 Kostenberechnung

Beispielhaft für die Implementierung einer ökonomischen Bewertungsgröße erfolgt im EXPOPLAN-Planungswerkzeug die Berechnung der Jahreskosten für die einzelnen Verfahrensstufen. Die in der Umsetzung hinterlegte Berechnung orientiert sich an den Vorgaben der KVR-Leitlinie [9] (schematische Darstellung des Ablaufs siehe Abbildung 5) und berücksichtigt die in Tabelle 2 dargestellten maßgebenden Größen. Berücksichtigt werden die Investitionen unterteilt in Bautechnik, Maschinenteknik und Elektrotechnik. Die Unterteilung in diese drei Gewerke ermöglicht den Ansatz unterschiedliche Abschreibungszeiträume bei der Berechnung der Jahreskosten. Bei den

Investitionen	Betriebskosten	Betriebserträge
Bautechnik	Energie	Energieerzeugung aus Biogas
Maschinentechnik	Personal	
Elektrotechnik	Wartung	
	Betriebsmittel	
	Schlammensorgung	

Tabelle 2: Bewertungsgrößen zur ökonomischen Verfahrensbeurteilung

Betriebskosten werden die Kosten für Energie, Personal, Wartung, Betriebsmittel und die Schlammensorgung abgeschätzt. Weiterhin ist es möglich, für Anlagen mit Biogaserzeugung eine monetäre Gutschrift der durch die Eigenenergieerzeugung vermiedenen Energiekosten zu berücksichtigen. In Tabelle 3 sind beispielhaft die berücksichtigten Betriebskosten und ihre Kostentreiber angegeben.

Für die Ermittlung der Investitionen und Betriebskosten der einzelnen Prozessstufen wird auf verfahrensspezifische Kostenkurven zurückgegriffen. Wichtig dabei ist, dass die Bezugsgröße, also der Kostentreiber, ein aus der EXPOPLAN-Berechnung resultierender Wert ist, damit die Bewertungsgrößen für verschiedene Szenarienberechnungen automatisch mitskaliert werden.

Während die spezifischen Kostenkennwerte häufig als Einzelwert angegeben werden, berücksichtigen die spezifischen Kostenkennwerte zur Ermittlung der Investitionen den degressiven Kostenverlauf, das heißt, mit zunehmender Anlagengröße sinken die spezifischen Baukosten. Das EXPOPLAN-Planungswerkzeug ermöglicht dazu die Einbindung von Kostenkurven. Diese werden in der allgemeinen Form

$$\text{spez. Kosten} = a \times x^b$$

dargestellt, wobei x jeweils diejenige Bemessungsgröße ist, auf die sich die Kostenkurve bezieht.

Für einen ersten grundsätzlichen Verfahrenvergleich liefert das Planungswerkzeug einen Default-Wert, der auf Basis von Literaturwerten für deutsche Kläranlagen gesetzt wurde. Das Besondere des praxisnahen Planungswerkzeuges ist aber, dass eigene spezifische Kennzahlen für die Kostengrößen hinterlegt werden können, um so anlagenspezifische oder örtliche Besonderheiten angemessen berücksichtigen zu können. Wichtig ist die Einbeziehung dieser Informationen insbesondere dann, wenn die örtlichen Rahmenbedingungen stark abweichen (zum Beispiel schlechte Untergrundverhältnisse, besondere Kostenstrukturen im Ausland).

3.3 Treibhausgase

Neben der Wirtschaftlichkeit können bei der Auswahl von Verfahrensvarianten auch andere Fragestellungen als Entscheidungskriterien eine Rolle spielen. Bekannt für die Beschreibung der Umweltauswirkungen ist das Verfahren der Ökobilanz/Life-Cycle-Assessment (LCA), das über die ISO-Normen 14040 bis 14044 standardisiert ist. Neben vollständigen Ökobilanzen unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Wirkungs-

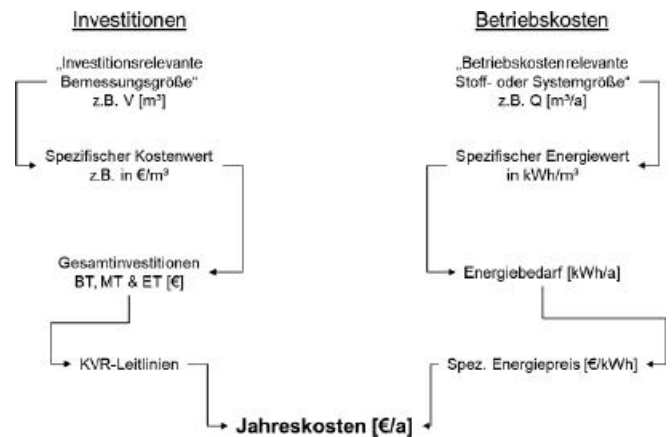


Abb. 5: Berechnungsschema zur Berechnung der Gesamt-Jahreskosten aus Investitionen und Betriebskosten

kategorien werden auch vereinfachte Ökobilanzen angewendet. Für das im EXPOPLAN-Planungswerkzeug beispielhaft umgesetzte Konzept einer ökologischen Verfahrensbeurteilung wurde als Bewertungsgröße das Treibhauspotenzial ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}$) ausgewählt, da es

- direkt aus den technischen und biologischen Reinigungsverfahren abgeleitet werden kann
- über die verschiedenen Verfahrenslösungen variiert und
- eine Eingangsgröße auch für andere ökologische Bewertungsverfahren (wie zum Beispiel LCA) darstellt.

Die Umsetzung im Planungswerkzeug erfolgte unter Implementierung der Bewertungsgrößen, die für die im EXPOPLAN-Planungswerkzeug berücksichtigten Verfahren aus Sicht der Autoren relevant und in jedem Fall zu berücksichtigen sind. Werden weitere Verfahrensmodule implementiert, sind diese gegebenenfalls zu erweitern – so zum Beispiel beim Einsatz

Betriebskostenart	Haupttreiber
Energiebedarf	
Pumpen	Fördermenge [m³/a], Förderhöhe [m]
Belüftung	erforderliche Sauerstoffzufuhr [g O ₂ /a]
Rührwerke	zu mischendes Beckenvolumen [m³]
Räumer	Anzahl der zu räumenden Becken [n]
Heizung	Temperaturdifferenz [Δt]
Schlamm-entwässerung	zu entwässernde Schlammmenge [m³/a]
Gutschrift Biogasverwertung	Methanertrag [Nm³/a] und Wirkungsgrad BHKW [%]
Personalbedarf	Personalaufwand [h/a]
Wartungsbedarf	als prozentualer Anteil an den Investitionen [%/a]
Betriebsmittelbedarf	
Polymerbedarf	entwässerte Feststofffracht [t TS/a]
Fällmittelbedarf	zu fällende P-Fracht [kg P/a] und β -Wert [-]
Schlamm-entsorgung	Schlammmenge in t OS/a

Tabelle 3: Berücksichtigte Betriebskosten und deren Haupttreiber

von Aktivkohle oder Membranen, bei denen gegebenenfalls die indirekten Emissionen bei der Herstellung oder Aufbereitung von Anlagenteilen mit sehr kurzen Nutzungsdauern ergänzend zu berücksichtigen sind.

Zur Abschätzung der CO_{2,eq}-Emission werden im EXPOPLAN-Planungswerkzeug als direkte Treibhausgas-Emissionen die Methan- und Lachgas-Emissionen berücksichtigt (GWP_{CH4} = 28; GWP_{N2O} = 265 [10]), die über spezifische Kennzahlen mit dem Stoffstrommodell und damit den Umsetzungsprozessen im Betrieb verknüpft sind.

Zur Abschätzung der indirekten Treibhausgasemissionen der Verfahren wurden die Emissionen aus der Energiebereitstellung und der Betriebsmittelherstellung, zum Beispiel von Fällmitteln, als relevant angesehen und eingebunden. Analog zu den Betriebskosten führt die Eigenenergieerzeugung aus Biogas zu einer Verminderung des externen Energiebezugs. Die dadurch vermiedenen Emissionen werden der Anlage als Guthschrift angerechnet.

Die Berechnung der jährlichen Emissionen erfolgt dann über die Multiplikation der emissionsrelevanten Stoff- oder Systemgröße mit dem stoff- oder systemspezifischen Emissionswert. Während für die direkten Treibhausgase bisher nur wenige meist in Forschungsprojekten erhobene systemspezifische Emissionswerte vorliegen, existieren für die stoffbezogenen indirekten CO_{2,eq}-Emissionen umfangreiche Inventare. Eine sehr umfangreiche Datenbank für unterschiedliche Wirkungsindikatoren stellt die Ecoinvent-Datenbank [11] dar. Je nach ausgewähltem Datensatz wird unter anderem auch die gesamte Wertschöpfungskette einschließlich Transportvorgänge berücksichtigt.

Hier besteht die Aufgabe des Planers insbesondere darin, die für den betreffenden Planungsfall maßgebenden Rahmenbedingungen zu definieren, da die spezifischen Indikatoren zum Teil sehr sensitiv sind und je nach Einzelfall und örtlichen Gegebenheiten stark variieren können (Beispiel Strom-Mix). Insbesondere die Ermittlung der direkten Emissionen (Lachgas, Methan) von einer Kläranlage ist komplex und mit relativ großen Unsicherheiten behaftet [12]. Sie sind stark abhängig von den aktuellen Betriebsbedingungen und dem Betrieb der Kläranlage. Aufgrund der hohen spezifischen Faktoren der direkten Emissionen und der teilweise recht groben Abschätzung kann ein hohes Fehlerpotenzial resultieren. Zu empfehlen ist daher eine getrennte Betrachtung von indirekten und direkten Emissionen, sowie die Durchführung von Sensitivitätsanalysen, was mit dem vorliegenden EXPOPLAN-Bewertungskonzept durch die freie Anpassungsmöglichkeit der Indikatoren einfach möglich ist.

4 Umsetzung in ein digitales Werkzeug

4.1 Ingenieurgerechte Implementierung der Verfahrensmodule

Zur Entwicklung der Web-Applikation wurde eine Methodik benötigt, die es Abwasserexperten ohne weitergehende Programmierkenntnisse ermöglicht, Bemessungsvorschriften für Verfahrensstufen, Kostenabschätzungen und CO_{2,eq}-Emissionen in standardisierter digitaler Form zu formulieren. Damit soll die selbständige Anpassung der bisherigen und die Implementierung weiter Verfahrensstufen durch unterschiedliche Anwender ermöglicht werden. Im Detail enthalten die Anforderungen an das Planungswerkzeug folgende Aspekte:

- Verwalten von (vielen) Variablen mit Eigenschaften (Einheit, Beschreibung etc.)
- Formulierung von mathematischen Gleichungen (algebraische Gleichungen) mit einem komfortablen Gleichungseditor, Dokumentation in typischer mathematischer Notation (Rendern von Formeln)
- einfache Organisation eines Programm-/Berechnungsflusses: lineare Abfolge, Bedingungen, Iterationen, in einfach erfassbarer Form (zum Beispiel grafisch)
- Unterstützung für typische Berechnungen: zum Beispiel Interpolation in Tabellen
- Einbeziehung von dynamischen Simulationen in den Berechnungslauf
- für Spezialfälle: direkte Integration von Programmcodes
- modularer Ansatz zur unabhängigen Entwicklung von Bemessungs- und Bewertungsberechnungen für einzelne Stufen.

Aus diesen Aspekten wird deutlich, dass das Lieblingswerkzeug der meisten Ingenieure – Microsoft Excel – hier nicht unbedingt die erste Wahl darstellt. Im Projekt wurde die Skript-Funktionalität des Simulationswerkzeugs SIMBA[#] [13] so erweitert, dass die oben genannten Anforderungen erfüllt werden können.

Die für die Ausführung der Dimensionierung erforderlichen Berechnungen sind teilweise von großer Komplexität und beinhalten optional die Durchführung stationärer oder dynamischer Simulationen. Daher wird auch für die Ausführung als Web-Applikation im Hintergrund eine dazu fähige Software be-

ABIONIK
AIR WATER LIFE

Ihr führender Systemanbieter für Wasser, Abwasser & Luft

INDUSTRIE KOMMUNEN MARITIM INDIVIDUELLE SPEZIALLÖSUNGEN

Getauchte Module für Membran-Bio-Reaktoren (MBR)

960 m² Filterfläche CUBE LFM 20124

über 100.000 Module weltweit im Einsatz, als wirkungsvolle Barriere gegen Bakterien und Viren

MARTIN LIKUSTA
STEINHARDT GUHONG
LIKUTECH MATING MO

MEMBERS OF → ABIONIK GROUP
ABIONIK GROUP
Friedrichstr. 95 | 10117 Berlin
ABIONIK.com

nötigt. In diesem Fall wird für jeden Anwender der Web-App eine Instanz der Software SIMBA[#] gestartet, die die erforderlichen Berechnungen ausführt. Damit die auf einem Web-Server beim ifak bereitgestellte Web-App mit dieser Instanz kommunizieren kann, muss SIMBA[#] über eine API (Application Program Interface) verfügen, die über Rechnergrenzen hinweg angesprochen werden kann. Die hierfür bereits verfügbare Schnittstelle wurde im Projekt funktional erweitert. Es wird im Wesentlichen ein HTTP-Server implementiert, der über HTTP Post JSON Objekte (JavaScript Object Notation) austauscht. Diese Schnittstelle ist leicht durch den Web-Server (prinzipiell realisierbar in ASP.NET oder auch in PHP oder jeder anderen Server-Sprache), aber auch durch Client-Anwendungen, wie zum Beispiel durch Javascript, aus Webseiten in aktuellen Browsern ansprechbar.

Für die Implementierung der Web-App wurde eine sogenannte Ritch-Client-Anwendung entwickelt. Das Benutzerinterface (User Interface) wird über HTML mit reaktiven Javascript-Komponenten umgesetzt. Es wird als Framework zur einfachen Realisierung von aktiven Webseiten das Javascript-Framework Vue [14] eingesetzt. Für dieses Framework existieren viele Erweiterungen, die anspruchsvolle Bedienkomponenten bereitstellen. Für die grundlegenden Daten-Tabellen und Eingabedialoge wird das Framework Vuetify [15] eingesetzt.

Für die Ergebnisausgabe wurden Vue-Komponenten zu Tabellendarstellungen, Fließgrafiken, Vergleichsdarstellungen entwickelt (siehe Beispiel in Abbildung 4).

Diese Web-Anwendung verbindet sich mit einer Simulator-Instanz mit eingebautem Web-Server. Durch die Web-App werden nacheinander für jede Verfahrensstufe das jeweilige Projekt geladen und der Programmablaufplan ausgeführt. Die Blöcke des Programmablaufplans definieren teilweise Nutzereingabe-Dialoge. Diese Dialoge werden beim Erreichen des Blocks in der Web-App dargestellt. Hier werden dann die erforderlichen Eingaben gemacht und mit „OK“ die Abarbeitung fortgesetzt. Ergebnisse können tabellarisch oder auch in Form von Ergebnisgrafiken dargestellt werden.

Die Web-App beinhaltet eine Projektverwaltung, einen Verfahrens-Konfigurator und verschiedene Optionen zur Ergebnisdarstellung und zum Vergleich von Projekten.

Bei der Entwicklung der Web-App wurden auch Aspekte der Datensicherheit und der europäischen Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) intensiv betrachtet. Im Ergebnis wurde darauf verzichtet, eine Nutzerverwaltung mit sicherer Authentifizierung und personenbezogenen Daten sowie ein zentrales Projektverzeichnis mit Nutzerprojekten vorzusehen. Alle Projektdaten werden lokal auf dem Rechner des Anwenders belassen (Daten stehen im Web-Browser-Cache) und können lokal gespeichert und geladen werden. Damit kann auf eine Nutzeranmeldung verzichtet werden, es werden weder Projektdaten noch personenbezogene Daten zentral gespeichert, und es können auch keine Fremddaten abgegriffen werden.

4.2 Transparente Verfahrensdarstellung zur individuellen Erstellung weiterer Module

Für die Verfügbarmachung der in langjähriger Forschungsarbeit definierten Bemessungsansätze aus dem DWA-Themenband T4/2016 wurde mit dem EXPOPLAN-Planungswerkzeug eine vorkonfektionierte Modellumgebung mit erprobtem Systemrahmen zur Erstellung von Verfahrensmodulen geschaffen.

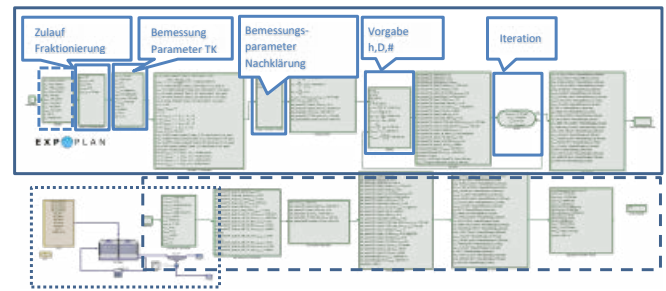


Abb. 6: Programmablaufplan Tropfkörperdimensionierung

Die Leistungs- und Bemessungsdaten der in den vorangegangenen Forschungsprojekten untersuchten Verfahrenstechniken der Abwasser- und Schlammbehandlung werden damit in einer transparenten Form der Fachgemeinschaft anwendungsorientiert zur Verfügung gestellt.

Die SIMBA[#]-Entwicklungsumgebung ermöglicht in Zukunft eine einfache Erweiterung des Planungswerkzeuges um neue Verfahrensstufen auch durch Dritte. So ist zum Beispiel eine Pulveraktivkohle-Stufe als 4. Reinigungsstufe in Entwicklung. Damit wird die Verbreitung und Validierung neuer, innovativer Techniken unterstützt.

In Abbildung 6 ist beispielhaft das Modul zur Tropfkörperdimensionierung und dessen Betriebsberechnung dargestellt. Details in dieser Grafik sind aufgrund der Auflösung nicht lesbar, aber der Programmablauf ist erkennbar. Mit dem durchgezogenen Rechteck ist der Bereich mit dem Berechnungsalgorithmus zur Dimensionierung markiert, das gestrichelte Rechteck markiert die Betriebsberechnung und das gepunktete Rechteck beinhaltet ein für die Berechnungen erforderliches stationäres Simulationsmodell.

Der Bereich mit der Dimensionierungsrechnung stellt grafisch einen sogenannten Programmablaufplan dar. Jeder Block repräsentiert eine Anzahl von Berechnungen und Aktionen, die Linien beschreiben den Programmfluss. Das heißt, wenn die Berechnung eines Blocks abgeschlossen ist, wird der nächste Block folgend der den Block verlassenden Linie berechnet. Hat ein Block mehrere Ausgangslinien, findet intern eine Fallunterscheidung statt, die festlegt, welcher Linie zu folgen ist. Damit lassen sich Bedingungen, Iterationen etc. transparent grafisch ausdrücken. Im Fall der Tropfkörperdimensionierung existiert weitgehend ein linearer Berechnungsverlauf (Zulauffraktionierung, Vorgabe von Parametern für Tropfkörper und Nachklärbecken). Die eigentliche Bemessung ist dann eine iterative Schleife, in der der Anwender manuell Höhe, Durchmesser und Anzahl der Tropfkörper vorgibt und in der aufgrund dieser Vorgabe die zu erwartenden Ablaufwerte mithilfe des stationären Simulationsmodells (gepunktetes Rechteck) solange berechnet werden, bis die Ablaufwerte zufriedenstellend eingehalten werden.

Jeder Block in dem Programmablaufplan kann über einen Editor konfiguriert werden. Folgende Aktionen sind dabei möglich:

- Anzeige und Veränderung von Variablen in einem Nutzerdialog
- Berechnung von Variablen über mathematische (algebraische) Ausdrücke
- Berechnung von Variablen durch Auswahl in Tabellen (Interpolation, nächster Wert ...)

- Setzen- und Lesen von Parametern und Ergebnissen eines Simulationsmodells, Durchführung einer Simulation
- Ausführung von Programmcode (C# oder Python).

In dem Entwicklungswerkzeug kann die entwickelte Dimensionierungsberechnung jederzeit getestet werden. Das Ergebnis jeder Aktion kann optional als Text innerhalb des Blocks dokumentiert werden, um während der Entwicklung eine einfache Ergebniskontrolle durchführen zu können.

Damit ein solches Projekt später in der Web-Applikation mit anderen Verfahrensmodulen verkettet werden kann, wurden Konventionen festgelegt, die diese Verkettung und Integration sicherstellen. Bei Einhaltung dieser Konventionen kann das Planungswerkzeug leicht um weitere Komponenten ergänzt werden. Durch die Einigung auf eine einheitliche Struktur und Modellumgebung ist der Austausch zwischen verschiedenen Anwendern, Forschungsgruppen und Entwicklern einfach möglich.

5 Ausblick

Im Rahmen des Projekts EXPOPLAN wurden die Bemessungsvorschriften des DWA-Themenbands T4/2016 [1] sowie Berechnungen der Kosten, Energieverbräuche und $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Fußabdrücke durch Siedlungswasserwirtschaftler der universitären Projektpartner [Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik (ISAH) der Leibniz Universität Hannover und Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik der Ruhr-Universität Bochum] mit vorgenannter Methode implementiert. Auch wenn die beteiligten Mitarbeiter gute Programmierkenntnisse besitzen, kann festgestellt werden, dass der formulierte Anspruch, ein Werkzeug zu entwickeln, das Fachleuten der Siedlungswasserwirtschaft ermöglicht, fachspezifische Dimensionierungsberechnungen in eine nutzbare digitale Form zu überführen, erfüllt wurde. Es ist geplant, die frei verfügbare Verfahrensbibliothek auch zukünftig zu erweitern und damit eine Plattform für den Verfahrensaustausch zu bieten. Eine wichtige Eigenschaft des entwickelten Systems ist dabei die einfache Pflöbarkeit und Erweiterbarkeit des Systems. Durch die Autoren, aber auch durch den Fördermittelgeber BMBF wird angestrebt, dass weitere Verfahrenskomponenten der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung, in denen die deutsche Wasserwirtschaft gute Lösungen anbieten kann, zukünftig in das Werkzeug integriert werden. Die für die Implementierung der Jahreskostenberechnung notwendige Erweiterung des Modells um die Betriebsphase bietet dabei auch die Möglichkeit für die Berechnung anderer stoffstrombasierter Kennzahlen.

Damit stellt das Web-basierte EXPOPLAN-Planungswerkzeug sowohl für die Software-Anwender, aber auch für die Entwickler weiterer Verfahrensmodule eine offene Plattform für eigene Projekte bereit.

Dank

Die präsentierten Ergebnisse des Verbundprojekts „EXPOPLAN – Entwicklung und Umsetzung eines Planungswerkzeuges zur Anwendung von EXPOVAL-Ergebnissen bei Anlagenplanung und -design im Ausland“ konnten dank einer Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) erarbeitet werden.

Literatur

- [1] DWA (Hrsg.): *Bemessung von Kläranlagen in warmen und kalten Klimazonen*, DWA-Themen T4/2016, Hennef, korrigierte Fassung November 2017, Download: <https://www.expoval.de/de/dwa-themenband>
- [2] Verbundprojekt „Exportorientierte Forschung und Entwicklung im Bereich Abwasser – Validierung an technischen Anlagen“ (EXPOVAL), <https://www.expoval.de>
- [3] Arbeitsblatt DWA-A 131: *Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen*, Hennef., 2016
- [4] Ahnert, M.; Alex, J.; Dürrenmatt, D. J.; Langergraber, G.; Hobus, I.; Schmuck, S.; Spering, V.: Dynamische Simulation als Bestandteil einer Kläranlagenbemessung nach DWA-A 131, *KA – Korrespondenz Abwasser Abfall* 2015, 62 (7), 615–624
- [5] Alex, J.; Dürrenmatt, D. J.; Langergraber, G.; Hobus, I.; Spering, V.: Voraussetzungen für eine dynamische Simulation als Bestandteil einer Kläranlagenbemessung nach DWA-A 131, *KA – Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2015, 62 (5), 436–446
- [6] Gujer, W.; Henze, M.; Mino, T.; van Loosdrecht, M.: Activated Sludge Model No. 3, *Water Sci. Technol.* 1999, 39 (1), 183–193
- [7] Beier, M.; Manig, N.; Rosenwinkel, K.-H.: *ERWAS – Verbundprojekt E-Klär: Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende*, Schlussbericht zum Teilprojekt, FKZ: 02WER1319B, 2018, <https://www.e-klaer.de>
- [8] Manig, N.: *Methodischer Ansatz zur zukunftsorientierten strategischen Planung von Kläranlagen*, Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Leibniz Universität Hannover, Heft 167, 2018
- [9] DWA (Hrsg.): *Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien)*, Juli 2012, 8. Aufl.
- [10] IPCC: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Core Writing Team, R. K. Pachauri, L. A. Meyer (Hrsg.), IPCC, Genf, 2014, S. 151 ff.
- [11] <https://www.ecoinvent.org>
- [12] Beier, M.: Direkte Treibhausgasemissionen von Kläranlagen – Messung, Einordnung der Relevanz und Maßnahmen zur Reduzierung, Gemeinschaftstagung Kläranlagentage/Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen, 26./27. Juni 2019, Bad Soden am Taunus
- [13] SIMBA#: SIMBA#4.2 Simulationssoftware für Wasser und Abwassersysteme, <https://simba.ifak.eu>, ifak e. V. Magdeburg
- [14] <https://vuejs.org>
- [15] <https://vuetifyjs.com>

Autoren

Dr.-Ing. Jens Alex

ifak – Institut für Automation und Kommunikation e. V.
Magdeburg

Werner-Heisenberg-Straße 1, 39106 Magdeburg

E-Mail: jens.alex@ifak.eu

Dr.-Ing. Maike Beier, Nils-Kristof Kabisch

Leibniz Universität Hannover

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik
Welfengarten 1, 30167 Hannover

Dr.-Ing. Tito Gehring

Ruhr-Universität Bochum

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik
Universitätsstraße 150, 44780 Bochum

Dr.-Ing. Tim Fuhrmann

Emscher Wassertechnik GmbH

Brunnenstraße 37, 45128 Essen

