

Simulation und Visualisierung von Stoffströmen in neuartigen Sanitärsystemen – Unterstützung der Analyse ihrer Funktion, Kosten und Ressourcenhaushalts

bzw.

Verifikation eines Planungswerkzeuges zur Simulation und Visualisierung von Stoffströmen in neuartigen Abwassersanitärsystemen Kurztitel: SAmPSONS


Abschlussbericht über ein Projekt, gefördert unter dem AZ 32768/01 und. 35081/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Disclaimer: Dieser Bericht basiert auf dem Abschlussbericht der Projektphase 1 vom 29.03.2019.
Wesentliche Neuerungen und Ergänzungen aus Projektphase 2 sind im Text in BLAU
hervorgehoben.

von

**Matthias Schulz, Imke Wißmann, Dr. Manfred Schütze, Dr.-Ing. Heinrich Söbke,
Dr.-Ing. Alexander Wriege-Bechtold, Tayebeh Zinati, Malte Kraus, Stefan Metz,
Dr.-Ing. Susanne Veser, Prof. Dr.-Ing. Matthias Barjenbruch, Prof. Dr.-Ing. Jörg Londong**

15.04.2021

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	32768/01-23	Referat	Fördersumme (Jahr 1-2)	305.257,00 €	
Az	35081/01-23		Fördersumme (Jahr 3)	147.950,00 €	
Antragstitel		Simulation und Visualisierung von Stoffströmen in neuartigen Sanitärsystemen für klima- und ressourcenschonendes Bauen			
Stichworte		Simulation, Ressourcenschutz, Klimaschutz, Nachhaltigkeitsbewertung, Neuartige Sanitärsysteme, Ressourcenorientierte Sanitärsysteme, Siedlungswasserwirtschaft, Ökobilanz, Visualisierung, Lebenszykluskosten			
Laufzeit		Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
Jahr 1-2: 24 + 6		01.07.2016	31.12.2018	1	
Jahr 3: 12+1		01.03.2020	31.03.2021	2	
Zwischenberichte		Vorläufiger Abschlussbericht (19.12.2018) Abschlussbericht Jahre 1-2 (29.03.2019) Abschlussbericht Jahr 3 (14.04.2021)			
Bewilligungsempfänger		Björnsen Beratende Ingenieure GmbH, Koblenz		Tel: 07152 3311-092 Fax: 07152 3311-091	
				Projektleitung Dr. S. Vesper	
				Bearbeiter Dipl.-Ök. M. Schulz	
Kooperationspartner		Technische Universität Berlin (TUB) Bauhaus Universität Weimar (BUW) ifak – Institut für Automation und Kommunikation e.V., Magdeburg			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Neuartige Sanitärsysteme (NASS) bzw. Ressourcenorientierte Sanitärsysteme (ROSS)¹ sind vor dem Hintergrund der Ressourcenverknappung, des sinkenden Wasserverbrauchs und damit einhergehender hydraulischer Probleme in unseren Abwasserkanälen sowie sich stetig ändernder Randbedingungen durch demografischen und klimatischen Wandel in den letzten Jahren immer stärker in den Fokus siedlungswasserwirtschaftlicher Betrachtungen gerückt. Wesentliche Ziele von ROSS sind die Wiedernutzung von Ressourcen (z.B. Nährstoffe, Wasser, Energie) sowie ein insgesamt nachhaltigeres Abwassermanagement. Das Projekt SAmPSONS hat sich zum Ziel gesetzt, durch die Entwicklung eines Simulationstools zu einer Versachlichung der Diskussionen beizutragen, die zu den ROSS-Technologien oft engagiert geführt werden. Dabei bestehen vielfach Vorbehalte, die häufig auf mangelnden Kenntnissen beruhen. Trotz erfolgreicher Erprobung der ROSS-Technologien ist deren gleichberechtigter Einsatz neben konventionellen Verfahren bislang nicht gegeben. Innerhalb des Projektes wurde das Simulationstool SAmPSONS entwickelt, mit dessen Hilfe sowohl ROSS als auch konventionelle Abwassermanagementtechnologien hinsichtlich ihrer Stoff- und Ressourcenströme simuliert und auf Basis von diversen Indikatoren bewertet und verglichen werden können. Dabei werden folgende Kriterien berücksichtigt: Nährstoffbilanzen (v.a. Stickstoff und Phosphor), energetische Bilanzierung, Kostenbilanzen (fixe und variable Kosten sowie die gesamten Lebenszykluskosten), verschiedene Umweltindikatoren (z.B. Treibhausgasemissionen und Eutrophierungspotenzial) sowie soziale Indikatoren (z.B. Akzeptanz). Ein besonderes Augenmerk wird auf das Verhalten und die Bilanzierung von Mikroschadstoffen (organischer Spurenstoffe) in den Behandlungsszenarien gelegt. In der zweiten Projektphase von SAmPSONS wurden neben der bereits integrierten Substanz Diclofenac zu weiteren Spurenstoffen, i.e. Benzotriazol, Iomeprol, Metoprolol und Sulfamethoxazol Informationen zu Reinigungsleistungen und Abbauraten integriert, der</p>					

¹ Zuletzt hat sich der Begriff Ressourcenorientierte Sanitärsysteme (ROSS) etabliert und wird im Weiteren anstelle von Neuartigen Sanitärsystemen (NASS) verwendet.

Betrachtungsraum erweitert, Rückkopplungen und zahlreiche weitere Technologien hinzugefügt sowie der Simulator erweitert.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Jahr 1-2:

Arbeitspaket 1: Recherche Stand der Forschung von Simulation und Visualisierung von ROSS; Datenerhebung von konventionellen und ROSS-Verfahrenstechniken (Erstellung von „Daten-Steckbriefen“); Konzepterstellung für den ROSS-Simulator.

Arbeitspaket 2: Integration der Daten-Steckbriefe in SAmPSONS (Simulationstool) als Verfahrensblöcke; Tests, Verfeinerung und Optimierung der Verfahrensblöcke.

Arbeitspaket 3: Anwendung anhand von Fallbeispielen; Evaluierung der Simulationsergebnisse; Optimierung des Simulationstools.

Jahr 3:

Arbeitspaket 1: Integration weiterer Verfahrensblöcke in SAmPSONS und Disaggregation von Steckbriefen;

Arbeitspaket 2: Untersuchung zur Integration weiterer anthropogener Spurenstoffe und eines Indikators Resilienz; Schließen von Datenlücken und Identifizierung von Forschungsbedarfen;

Arbeitspaket 3: Erweiterung des Bilanzraumes und Integration von Gutschriften für die Substitution von konventionellen Düngemitteln;

Arbeitspaket 4: Zusätzliche Validierung und Verfeinerung des SAmPSONS-Tools sowie Erhöhung des Nutzerkomforts;

Arbeitspaket 5: Öffentlichkeitsarbeit und Verstetigung

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

Ergebnisse und Diskussion

Der Vergleich von verschiedenen Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen für die Sanitärversorgung von kleineren und mittleren Siedlungsgebieten erfordert die Berücksichtigung mannigfaltiger Aspekte. Heutzutage sind diese nicht nur auf die Kosten zu beschränken. Immer stärker ist der Wunsch, die Nachhaltigkeitswirkungen ganzheitlich in den Untersuchungen darzustellen. Dazu wurde in SAmPSONS ein geeigneter Kriterienkatalog erstellt und in einem computergestützten Tool umgesetzt. SAmPSONS ermöglicht Nutzer*innen wie zum Beispiel Planer*innen, kommunalen Entscheidungsträger*innen, Mitarbeiter*innen von Zweckverbänden etc., verschiedene Szenarien bei der Vorplanung von Sanitärsystemen hinsichtlich unterschiedlicher Teilziele wie Ökologie, Ökonomie und sozialer Faktoren miteinander zu vergleichen. Die Ergebnisse der Nachhaltigkeitsbewertung ermöglichen gleichzeitig eine vertiefte Bewusstseinsbildung bei den Nutzern*innen sowie bei Multiplikator*innen. Für die diversen Verfahrensschritte von Abwasseranfall bis zur finalen Behandlung wurden eine Vielzahl von Daten-Steckbriefen entwickelt, die als Verfahrensblöcke in ein auf SIMBA#-basierendes Simulationstool integriert wurden. Nach weitgehender Fertigstellung von SAmPSONS und ersten Tests der Verfahrensblöcke wurde eine Validierung anhand von Fallbeispielen durchgeführt. **In der zweiten Phase wurde zahlreiche weitere Technologien hinzugefügt.** Dabei zeigte sich, dass SAmPSONS für viele Anwendungsgebiete plausible und mit detaillierten Untersuchungen vergleichbare Ergebnisse liefert. Aufgrund der komplexen Wirklichkeit und den für SAmPSONS notwendigen Vereinfachungen, kann das ausschließliche Nutzen der in SAmPSONS hinterlegten Standard-Werte (im Folgenden: Default-Werte) aber zu Verzerrungen und Ungenauigkeiten führen. Dies ist besonders bei Kostenauswertungen zu beachten. In diesen Fällen können sich eingearbeitete Nutzer*innen aber der Möglichkeit bedienen, die in SAmPSONS hinterlegten Defaultwerte auf spezifische Anwendungsfälle flexibel anzupassen. Ein großer Vorteil von SAmPSONS zeigt sich dann in der unmittelbaren Analyse und Ergebnisauswertung auf Basis der angepassten Werte. Die erstellten Steckbriefe mit allen Original- bzw. Default-Werten sind entsprechend aufbereitet und für SAmPSONS-Nutzer*innen dokumentiert.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

- 2. SAmPSONS Online Seminar am 21.04.2021
- 1. SAmPSONS Online Seminar am 17.11.2020. Verfügbar auf YouTube unter: <https://www.youtube.com/watch?v=6O2E7aiSMpw&t=52s>

- Präsentation von SAmpSONS bei der DWA Arbeitsgruppensitzung (DWA-Arbeitsgruppe KA-1.1, „Technik und Bemessung“) am 28.06.2019 in Koblenz bzw. am 18.09.2020 (online).
- Zinati, T., Wriege-Bechtold, A., Barjenbruch, M., Schütze, M., Schulz, M., Kraus, M., Wißmann, I., Vesper, S., Söbke, H., Londong, J. (eingereicht): SAmpSONS: Softwarewerkzeug zur vergleichenden Vorplanung von Abwasserinfrastrukturen. Eingereicht an Korrespondenz Abwasser Abfall im Dez. 2020.
- Schulz, M., Schütze, M., Zinati, T., Söbke, H., Wißmann, I., Kraus, M., Vesper, S., Wriege-Bechtold, A., Barjenbruch, M., Londong, J. (eingereicht): SAmpSONS: A software tool for comparative preliminary sustainability assessment of wastewater infrastructure systems. Abstract submitted to IWA Conference 2021 in Poznan, Poland 14.12.2020.
- Zinati, T., Barjenbruch, M., Schütze, M., & Wriege-Bechtold, A., (2020): Assessment of urban sanitation concepts for sustainable wastewater management, first International Conference on Urban Water Interfaces, 22.-24. Sep. 2020, abstract and online oral presentation
- Zinati, T., Barjenbruch, M. & Wriege-Bechtold, A., (2019a): Nutrient recovery efficiency of urban sanitation systems, the 7th International Water Association (IWA) specialist conference on natural organic matter (NOM7), 7.-10. Oct.2019, Tokyo, Japan, abstract and poster presentation
- Zinati, T., Barjenbruch, M. & Wriege-Bechtold, A., (2019b): Integrated nexus model for sustainable urban sanitation system. Proceedings of 11th World Congress of EWRA on Water Resources and Environment, 25.-29. 06. 2019, Madrid, Spain, oral presentation and reviewed paper: Garrote, L.; Tsakiris, G.; Tsihrintzis, V. A.; Vangelis, H.; Tigkas, D (Eds.) (2019): Managing Water Resources for a Sustainable Future. Proceedings of the 11th World Congress of EWRA on Water Resources and Environment. 11th WORLD CONGRESS on Water Resources and Environment. Madrid, Spain, 25-29 June, ISBN: 978-618-84419-0-3
- Schütze, M., Wriege-Bechtold, A., Zinati, T., Söbke, H., Wißmann, I., Schulz, M., Vesper, S., Londong, J., Barjenbruch, M., Alex, J. (2019): Simulation and Visualization of Material Flows in Sanitation Systems for Streamlined Sustainability Assessment. Water Science and Technology, 79(10), 1966–1976. doi.org/10.2166/wst.2019.199
- Zinati, T., Wriege-Bechtold, A., Zinati, B., Barjenbruch, M. & Lenzen, M., (2019): Assessment of source separated sanitation technologies for sustainable wastewater management, 12th IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse, 16.-20. June.2019, Berlin, Germany, abstract and oral presentation
- Schulz, M., Wißmann, I., Schütze M., Zinati, T., Wriege-Bechtold, A, Söbke, H., Vesper, S., Londong, J., Barjenbruch, M., Alex, J. (2019): SAmpSONS: Simulation und Visualisierung von Stoffströmen in Sanitärsystemen zur Nachhaltigkeitsbewertung. Veröffentlichung im Tagungsband der DWA-Landesverbandstagung am 19.06.2019 in Leipzig.
- Wissmann, I., Schulz, M., Vesper, S., Wriege-Bechthold, A., Zinati, T., Söbke, M., Schütze, M. (2019): Projekt SAmpSONS – Simulation und Visualisierung von Stoffströmen in neuartigen Sanitärsystemen – Unterstützung der Analyse ihrer Funktion, Kosten und Ressourcenhaushalts. 26. Simba-Anwendertreffen, Merseburg, 14./15.05.2019
- Zinati Shoa, T. and Barjenbruch, M.: Nutrient recovery by source separated sanitation technologies, IWA Nutrient Removal & Recovery Conference 2018, Brisbane, Australia, 18-21 November 2018.
- Schütze, M., Wriege-Bechtold, A., Söbke, H., Wißmann, I., Schulz, M., Vesper, S., Londong, J., Barjenbruch, M., Alex, J.: Simulation and Visualization of Material Flows in Sanitation Systems for Streamlined Sustainability Assessment; IWA Conference on Small Water & Wastewater Systems and Resources Oriented Sanitation; SWWS2018; Haifa, Israel, 14-18 October 2018
- Vorstellung einer Entwurfsversion von SAmpSONS auf der IFAT München, 14.-18.05.2018
- Zinati, T. & Barjenbruch, M., (2018): Evaluation of different treatment technologies of source-separated urine. Proceedings of 10th Eastern European Young Water Professionals Conference, 7.-12. May. 2018, Zagreb, Croatia, reviewed paper and oral presentation, ISBN: 978-953-8168-23-9

- Zinati, T. & Barjenbruch, M., (2017): Simulation of sanitation concepts for source separated wastewater. Proceedings of 8.th International Young Water Professionals Conference, 10.-13. Dec. 2017, Cape Town, South Africa, abstract and oral presentation
- Zinati, T., Barjenbruch, M. & Wriege-Bechtold, A., (2017): Source separation technologies, opportunities for sustainable wastewater management. European Water Resources Association, 58: 111-117, 2017., ISSN: 1105-7580
- Zinati, T., Barjenbruch, M. & Wriege-Bechtold, A., (2017a): Assessment of material and energy flow efficiency in different source separated sanitation technologies. Proceedings of the 9th Eastern European Young Water Professionals Conference, 24.-27. May. 2017, Budapest, Hungary, reviewed paper and oral presentation, ISBN: 978-963-313-256-2
- Zinati, T., Barjenbruch, M. & Wriege-Bechtold, A., (2017b): Source separation technologies, opportunities for sustainable wastewater management. Proceedings of 10th World Congress of EWRA on Water Resources and Environment, 05.-09. Jul. 2017, Athens, Greece, reviewed paper and oral presentation

Fazit

Es zeigte sich, dass mit SAmpSONS den Anwender*innen eine geeignete Möglichkeit gegeben wird, konventionelle und ressourcenorientierte Sanitärsysteme vergleichend darzustellen und dabei über die gängigen Auswertungskriterien (ökonomische Parameter) hinauszugehen und ökologische und soziale Aspekte (Emissionen, Verhalten organischer Spurenstoffe, Akzeptanz etc.) in die Bewertungen miteinzubeziehen. Über die Nutzung des Simulationstools und die darin integrierten Verfahrensblöcke wird die Nachhaltigkeitsbewertung unterschiedlicher Alternativen stark vereinfacht und der Zeitaufwand reduziert.

In der Projektphase 2 wurden weitere Ergänzungen und Anpassungen an der bestehenden Version von SAmpSONS herbeigeführt. Dies umfasst die Integration zahlreicher zusätzlicher Technologien des Abwassermanagements, insbesondere der Schlammbehandlung, P-Rückgewinnung und von Technologien der 4. Reinigungsstufe, die Möglichkeit zur Auswertung weiterer Spurenstoffe sowie des Indikators Resilienz und die Berücksichtigung von Gutschriften für die Substitution von konventionellen Düngemitteln. Ferner wurde SAmpSONS auf Basis weiterer Fallbeispiele validiert, die Nutzer*innenfreundlichkeit von SAmpSONS z.B. durch zusätzliche Auswertoptionen erhöht, das Tool einer erweiterten potentiellen Nutzer*innenschaft vorgestellt und dessen zukünftige Anwendung und Verstetigung vorangetrieben. Mit der vorliegenden Version von SAmpSONS2 steht ein statisches Simulationstool zur Verfügung, das flexibel auf unterschiedlichste Abwasserinfrastrukturszenarien anwendbar ist.

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	6
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	9
TABELLENVERZEICHNIS	12
VERZEICHNIS VON BEGRIFFEN, ABKÜRZUNGEN UND DEFINITIONEN	14
1 ZUSAMMENFASSUNG	17
2 EINLEITUNG	19
2.1 Problemstellung und Zielsetzung	19
2.2 Umweltrelevanz	20
2.2.1 Darstellung der umweltspezifischen Herausforderungen	20
2.2.2 Umweltrelevante Ziele (DBU-Bezug).....	21
3 HAUPTTEIL	23
3.1 Technologien und Behandlungsverfahren/Beschreibung der SAmpSONS-Verfahren	23
3.1.1 Mustersteckbrief	24
3.1.2 Abgrenzung des Bilanzraumes	25
3.1.3 Vorgehen bei der Daten-Steckbrieferstellung.....	26
3.1.4 Erhebung der Default-Werte	26
3.1.5 Skalierung	28
3.2 Konzepterstellung und Simulation	29
3.2.1 Zielsetzung.....	29
3.2.2 Aufbau des Simulators	29
3.2.2.1 Definition der relevanten Stoffströme:	30
3.2.2.2 Definition von Auswerteindikatoren:	30
3.2.2.3 Erstellung von Auswertungsroutinen	36
3.2.2.4 Auswahl und Zusammenstellung der Umweltprofile	37
3.2.2.5 Umsetzung der Technologie-Steckbriefe in Simulationsmodule	37
3.2.3 Erweiterungen des Simulatorkerns	38
3.2.4 Integration von Gutschriften für die Substitution von konventionellen Düngemitteln	39
3.3 Öffentlichkeitsarbeit, Verstetigung und Qualitätssicherung	40
3.3.1 Hosting und Support von SAmpSONS	43
3.3.2 Kontinuierliche Erweiterung von SAmpSONS	43

3.4 Wesentliche Ergebnisse - Fallbeispiele	45
3.4.1 Fallbeispiel 1- Wohlsborn (BUW).....	46
3.4.1.1 Szenario 1: Ist-Zustand	46
3.4.1.2 Szenario 2: Konventionelles Abwassersystem	47
3.4.1.3 Szenario 3: ROSS	47
3.4.1.4 Szenario 4: Grauwasser-Wiederverwendung	48
3.4.1.5 Vorgehen.....	49
3.4.2 Fallbeispiel 2: Ergebnisse aus dem SCST-Projekt Stahnsdorf und Dissertation Remy (2010) (TUB).....	50
3.4.2.1 Darstellung des in SAmPSONS simulierten Systems	53
3.4.2.2 Erfassung.....	53
3.4.2.3 Transport und Behandlung	53
3.4.2.4 Vergleich der verschiedenen Parameter	54
3.4.2.5 Nährstoffe	55
3.4.2.6 Chemischer Sauerstoffbedarf - CSB	57
3.4.2.7 Energiebedarf	58
3.4.2.8 Umweltwirkungen	59
3.4.2.9 Eutrophierungspotenzial	60
3.4.2.10 Treibhauspotenzial.....	60
3.4.2.11 Primärenergieeinsatz.....	60
3.4.2.12 Fazit	61
3.4.3 Fallbeispiel 3: Ressourcenorientierte Sanitärsysteme (ROSS) – Eine Bilanzierung von Nährstoffen, Energieverbrauch und CO ₂ -Emission (BCE).....	61
3.4.3.1 Darstellung der Systeme	61
3.4.3.2 Vergleich der Stickstoff-Bilanzen.....	63
3.4.3.3 Vergleich der Phosphor-Bilanzen.....	66
3.4.3.4 Vergleich der potenziellen Umweltwirkungen Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen.....	69
3.4.3.5 Spezifische vergleichende Analyse des Referenzsystems	70
3.4.3.6 Spezifische vergleichende Analyse des Systems 3	73
3.4.3.7 Fazit.....	74
3.4.4 Fallbeispiel 3: Darstellung der Diclofenac-Reinigungsleistung auf Basis des Arbeitsberichtes (BCE).....	75
3.4.4.1 Vergleich der Beispiele	76
3.4.4.2 Fazit zum Vergleich	76
3.4.5 Fallbeispiel 4: Birkenfeld (BCE).....	77
3.4.5.1 Vergleich der Investitionskosten.....	78
3.4.5.2 Fazit.....	80
3.4.6 Fallbeispiel 5: Vergleich Verfahren 4. Reinigungsstufe (BCE)	81

3.4.6.1	Aufbau des Fallbeispiels	81
3.4.6.2	Ergebnisse Vergleich 4. Reinigungsstufe	82
3.4.7	Fallbeispiel 6: Klärschlammverwertung disaggregierte vs. aggregierte Blöcke (TUB)	86
3.4.8	Fallbeispiel 7: Vergleich unterschiedliche P-Rückgewinnungstechnologien (BCE)	92
3.4.8.1	Überblick über die Verfahren zur P-Rückgewinnung in SAmpSONS	93
3.4.8.2	Grundlagen Fallbeispiel und Vergleich mit SAmpSONS	93
3.4.8.3	Vergleich der Ergebnisse in SAmpSONS mit den Ergebnissen im PHORWÄRTS-Bericht	96
3.4.8.4	Fazit Fallbeispiele zur P-Rückgewinnung	102
4	FAZIT UND AUSBLICK	103
5	LITERATUR	105
	ANHANG	107
A	MODULBIBLIOTHEK IN SAMPSONS	108
B	PARAMETER ZUR BERECHNUNG VON UMWELTWIRKUNGEN	111
C	MUSTER DATEN-STECKBRIEF	113
D	DATEN-STECKBRIEFE	116

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: In SAmpSONS2 vorhandene Technologien.....	24
Abbildung 2: Kategorien zum Datenqualitäts-Rating	25
Abbildung 3: In SAmpSONS betrachtete Stoffströme.....	30
Abbildung 4: Übersicht der in SAmpSONS integrierten Auswerteindikatoren.	31
Abbildung 5: Berechnungsschema zur Ermittlung des Indikatorwertes „Resilienz“.....	35
Abbildung 6: Berechnungsalgorithmus zur Ermittlung des Indikatorwertes „Resilienz“.....	36
Abbildung 7: Auszug aus dem Parameterdialog für den Block „Kläranlage alle Größenklassen“ ...	37
Abbildung 8: Nutzer*innenschnittstelle des SAmpSONS-Simulators.....	38
Abbildung 9: Module „Spülwasser-Management“ und „Zentrat-Rückführung“ für Rückführung und Management von Ressourcenströmen	39
Abbildung 10: Verstetigungsprozess in SAmpSONS.....	44
Abbildung 11: Wohlsborn-Szenario 1: Ist-Zustand	47
Abbildung 12: Wohlsborn-Szenario 2: Konventionelles Abwassersystem.....	47
Abbildung 13: Wohlsborn-Szenario 3: ROSS.....	48
Abbildung 14: Wohlsborn-Szenario 3 (ROSS): Sankey-Diagramm der Stoffströme (Einheit: m ³ /d)	48
Abbildung 15: Wohlsborn-Szenario 4 (Grauwasser-Wiederverwendung): Sankey-Diagramm der Stoffströme (Einheit: m ³ /d).....	49
Abbildung 16: Darstellung des stoffstromorientierten Sanitärkonzeptes in KWB (2012)	50
Abbildung 17: Untersuchungsgebiet (Berlin Nicolassee) für verschiedene Szenarien im SCST- Projekt (Otterwasser 2007).....	51
Abbildung 18: Untersuchte Verfahrenskombinationen nach REMY (2010)	52
Abbildung 19: Szenario V2 aus der Dissertation von REMY (2010)	52
Abbildung 20: in SAmpSONS erstelltes Simulationsbeispiels anhand der Verfahrenskombination Szenario V2 im SCST-Projekt (REMY (2010)).....	53
Abbildung 21: Sankey-Diagramm zum Stickstoff-Recycling-Potenzial [kg N/d]	55
Abbildung 22: Sankey-Diagramm zum Phosphor-Recycling-Potenzial [kg P/d].....	56
Abbildung 23: Sankey-Diagramm zum Kalium-Recycling-Potenzial [kg K/d].....	56
Abbildung 24: CSB-Sankey-Diagramm	57
Abbildung 25: Energiebedarf im Vergleich von SAmpSONS und aus dem Remybeispiel (REMY 2010).....	58
Abbildung 26: Fließbild des Systems 3 (li.) und des Referenzsystems (re.) (DWA 2017).....	62
Abbildung 27: Abbildung des Referenzsystems in SAmpSONS.....	63
Abbildung 28: Abbildung von System 3 in SAmpSONS.....	63
Abbildung 29: Darstellung der N-Frachten des Referenzsystems im Sankey-Diagramm [kg/d].....	64
Abbildung 30: Darstellung der N-Frachten des Referenzsystems im Sankey-Diagramm nach Anpassung der N-Reinigungsleistung und der N-Elimination [kg/d].....	65
Abbildung 31: Darstellung der N-Frachten von System 3 im Sankey-Diagramm [kg/d].....	65

Abbildung 32: Darstellung der N-Frachten von System 3 im Sankey-Diagramm nach Anpassung der GW-Behandlung [kg/d].....	66
Abbildung 33: Darstellung der P-Frachten des Referenzsystems im Sankey-Diagramm [kg/d].....	67
Abbildung 34: Darstellung der P-Frachten im Referenzsystem nach Anpassung der Reinigungsleistung [kg/d].....	68
Abbildung 35: Darstellung der P-Frachten von System 3 im Sankey-Diagramm [kg/d].....	68
Abbildung 36: Darstellung der P-Frachten von System 3 im Sankey-Diagramm nach Anpassung der GW-Reinigungsleistung [kg/d].....	69
Abbildung 37: Darstellung der Diclofenac-Fracht im Referenzsystem im Sankey-Diagramm [kg/d].	76
Abbildung 38: Darstellung der Diclofenac-Fracht in System 3 im Sankey-Diagramm [kg/d].....	76
Abbildung 39: Vergleich der Investitionskosten des UCB-Bericht mit den Ergebnissen in SAmpSONS.....	78
Abbildung 40: Verhältnis der Kosten in SAmpSONS im Vergleich zu den Kosten im UCB-Bericht für den Biogas-Fermenter und die Schwarzwasseraufbereitung in Abhängigkeit von der Zurechnung der zusätzlichen Kosten.....	80
Abbildung 41 Referenzsystem für Fallbeispiele der 4. Reinigungsstufe.....	81
Abbildung 42 Fallbeispiel Referenzsystem mit 4. Reinigungsstufe Aktivkohlefilterung.....	82
Abbildung 43: Reinigungsleistungen der 4. Reinigungsstufen für fünf organische Spurenstoffe	83
Abbildung 44: Spurenstoffeintrag und -austrag per Technologie der 4. Reinigungsstufen, modelliert in SAmpSONS2.....	83
Abbildung 45 Kapital- und Betriebskosten der 4. Reinigungsstufen, modelliert in SAmpSONS2....	84
Abbildung 46 Eutrophierungspotenzial der 4. Reinigungsstufen, simuliert in SAmpSONS2.....	84
Abbildung 47 Treibhausgaspotenzial der 4. Reinigungsstufen, simuliert in SAmpSONS2.....	85
Abbildung 48 Primärenergiebedarf der 4. Reinigungsstufen, simuliert in SAmpSONS2	86
Abbildung 49: Aggregiertes und disaggregiertes Szenario (bis zur Kläranlage sind Szenarien gleich).....	87
Abbildung 50: Disaggregiertes Szenario: Treibhausgasemissionen im Betrieb (gruppiert).....	91
Abbildung 51: Disaggregiertes Szenario: Treibhausgasemissionen im Betrieb (aufgeschlüsselt nach einzelnen Komponenten)	92
Abbildung 52: Darstellung des Referenzsystems in SAmpSONS	95
Abbildung 53: Darstellung des System mit dem Rückgewinnungsverfahren AshDec in SAmpSONS	95
Abbildung 54: Darstellung des System mit dem Rückgewinnungsverfahren TetraPhos in SAmpSONS	95
Abbildung 55: Ergebnisse des detaillierten Vergleiches des Primärenergiebedarfs [MJ] des AshDec-Verfahrens.....	99
Abbildung 56: Ergebnisse des detaillierten Vergleiches des Primärenergiebedarfs [MJ] des TetraPhos-Verfahrens	100
Abbildung 57: Ergebnisse des detaillierten Vergleiches des Treibhausgaspotenzials des AshDec-Verfahrens.....	101

Abbildung 58: Ergebnisse des detaillierten Vergleichs des Treibhausgaspotenzials des TetraPhos-Verfahrens..... 101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Sachbilanz Mineraldüngerproduktion.....	40
Tabelle 2: Darstellung des Fallbeispiels in SAmpSONS und Vergleich mit denen in SCST Bericht untersuchten Technologien	54
Tabelle 3: Vergleich der Nährstoffrecyclingpotenziale aus SAmpSONS und dem Remy-Beispiel (REMY (2010))	57
Tabelle 4: Darstellung der Ergebnisse für die Indikatoren Eutrophierungspotenzial, Treibhausgaspotenzial und Primärenergieeinsatz im Vergleich.....	60
Tabelle 5: Darstellung der Fallbeispiele in SAmpSONS und Vergleich mit den im DWA- Arbeitsbericht beschriebenen Technologien.....	62
Tabelle 6: Vergleich der N-Frachten des Referenzsystems am Ausgang der Kläranlage.....	63
Tabelle 7: Vergleich der N-Frachten des Referenzsystems am Ausgang der Kläranlage nach Anpassung der N-Reinigungsleistung und der N-Elimination.....	65
Tabelle 8: Vergleich der N-Frachten von System 3 an den Senken.....	65
Tabelle 9: Vergleich der N-Frachten von System 3 an den Senken (Gewässer, Zentrat, entwässerter Schlamm) nach Anpassung der GW-Behandlung.....	66
Tabelle 10: Vergleich der P-Frachten des Referenzsystems im Ausgang der Kläranlage.....	66
Tabelle 11: Vergleich der P-Frachten am Ausgang der Kläranlage.....	67
Tabelle 12: Vergleich der P-Frachten im System 3.....	68
Tabelle 13: Vergleich der P-Frachten von System 3 nach einer Anpassung der Reinigungsleistung.	68
Tabelle 14: Vergleich potenzielle Umweltwirkungen (Treibhausgasemissionen und Primärenergiebedarf) Referenzsystem gegenüber Auswertungen in SAmpSONS.....	72
Tabelle 15: Vergleich potenzielle Umweltwirkungen (Treibhausgasemissionen und Primärenergiebedarf) System 3 gegenüber Auswertungen in SAmpSONS.....	74
Tabelle 16: Darstellung der im UCB-Bericht beschriebenen Technologien und deren Abbildbarkeit in SAmpSONS.....	77
Tabelle 17: Die wesentlichen Parameter des Zuflusses in jedem Szenario.....	88
Tabelle 18: Ablauf in Gewässer in jedem Szenario.....	88
Tabelle 19: Abfluss im Schlamm in jedem Szenario.....	89
Tabelle 20: Energieaufwand in jedem Szenario.....	90
Tabelle 21: Energie- und CO ₂ -Bilanz in jedem Szenario.....	90
Tabelle 22: Parameter für die Bilanzierung.....	90
Tabelle 23: In SAmpSONS berücksichtigte P-Rückgewinnungsverfahren (modifiziert auf Basis von Kraus et al., 2019).....	93
Tabelle 24: Darstellung der im PHORWÄRTS-Bericht beschriebenen Technologien und deren Abbildung in SAmpSONS.....	94
Tabelle 25: Vergleich der Stoffströme und der Frachten zwischen dem PHORWÄRTS-Bericht und der Simulation in SAmpSONS.....	96

Tabelle 26: Ergebnisse des Vergleiches des Primärenergiebedarfs der unterschiedlichen P-Rückgewinnungsverfahren	97
Tabelle 27: Ergebnisse des Vergleiches des Treibhausgaspotenzials der unterschiedlichen P-Rückgewinnungsverfahren	100

Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

Abkürzung	Bedeutung/Erläuterung
%	Prozent
a	Annus - Jahr
AO	Altort
ASH	Ash - Asche
BCE	Björnsen Consulting Engineers – Björnsen Beratende Ingenieure
BG	Biogas
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BSB	Biochemischer Sauerstoffbedarf
BUW	Bauhaus-Universität Weimar
BW	Black water, Schwarzwasser
BWA	Biowaste - Bioabfall
CAPEX	Capital Expenditure – Investitionsausgaben für längerfristige Anlagegüter
CAS	Conventional activated sludge – konventioneller Belebtschlamm
CH ₄	Methan
C-Kette	Kohlenstoffkette
CO ₂	Kohlen(stoff)dioxid
COD	Chemical oxygen demand – chemischer Sauerstoffbedarf
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
d	Day – Tag
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
€	Euro
EntwMoV	Entwässerung und Monoverbrennung
EP	Eutrophierungspotenzial
eq./äq.	Äquivalent
ESAT	Environmental Sustainability Assessment Tool
EW	Einwohner
FA	Fäzes
FauEntwTroMoV	Faulung, Entwässerung, Trocknung und Monoverbrennung
FE	Fertilizer - Dünger
FL	Flush water – Spülwasser
g	Gramm
GaBi	Software System und Datenbank zur Ganzheitlichen Bilanzierung
GesN	Gesamter Stickstoff
GK 1-5	Größenklasse (Kläranlagen) 1-5
GW	Grey water - Grauwasser
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
HDPE	High Density Polyethylene - Polyethylen
HTC	Hydrothermale Karbonisierung
ifak	Institut für Automation und Kommunikation e.V.
IfaS	Institut für angewandtes Stoffstrommanagement
IWA	International Water Association
K	Kalium
KA	Korrespondenz Abwasser, Abfall (Zeitschrift der DWA)
KAZ	Küchenabfallzerkleinerer
kg	Kilogramm
KKA	Kleinkläranlage

km	Kilometer
KS	Klärschlamm
KWB	KompetenzZentrumWasserBerlin
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
LCA	Life Cycle Assessment – Lebenszyklusanalyse, Ökobilanz
LCC	Life Cycle Costing - Lebenszykluskostenrechnung
LE	Leachate (Sickerwasser)
LKW	Lastkraftwagen
Lorry_22/_11	LKW mit entsprechendem Gewicht und Nutzlast
m	Meter
m ² /m ³	Quadratmeter/Kubikmeter
MAP-Fällung	Magnesium-Ammonium-Phosphat-Fällung
MBR	Membrane bioreactor - Membranbioreaktor
min	minimal
MJ	Megajoule
MWh	Megawattstunde
N	Stickstoff
N ₂ O	Distickstoffmonoxid, „Lachgas“
NASS	Neuartige Sanitärsysteme
NG	Neubaugbiet
NH ₃	Ammoniak
NH ₄ -N	Ammoniumstickstoff
NO ₃ -N	Nitrat-Stickstoff
NO _x	Stickoxide
NO _x -N	Stickoxide als N-Emissionen
P	Phosphor
P _{ges}	Gesamter Phosphor
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PE	Primärenergiebedarf
PKA	Pflanzenkläranlage
PO ₄	Phosphat
PP	Polypropylen
PTGW	Pre-treated greywater – vorbehandeltes Grauwasser
PTGW	Pre-treated Greywater – vorbehandeltes Grauwasser
PTWW	Pre-treated wastewater – vorbehandeltes Abwasser
PVC	Polyvinylchlorid
ROSS	Ressourcenorientierte Sanitärsysteme
RW	Rainwater – Regenwasser (mit Fremdwasser)
S	Schwefel
SAMPSONS	Simulation und Visualisierung von Stoffströmen in neuartigen Sanitärsystemen
SBR	Sequencing batch reactor – z. B. für Trübwasserbehandlung des Prozesswassers
SCST	EU-Demonstrationsprojekt: Sanitärkonzepte für die separate Erfassung und Behandlung von Urin, Fäkalien und Grauwasser
SIMBA#	Name eines Simulationssystems
SL	Sludge - Schlamm
SLD	Digested sludge - Faulschlamm
SLT	Thickened sludge – eingedickter Schlamm
SMBR	Getauchter Membranbioreaktor
SO ₂	Schwefeldioxid
t	Tonne

TGW	Treated Greywater – behandeltes Grauwasser
THG	Treibhausgasemission
TN	Total Nitrogen – Gesamt Stickstoff
TP	Total Phosphorous – Gesamt Phosphor
TUB	Technische Universität Berlin
TWIST++	Verbundprojekt Transitionswege WasserInfraSTruktursysteme
TWW	Treated Wastewater – behandeltes Abwasser
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor
UCB-Bericht	Umwelt-Campus Birkenfeld, Abschlussbericht des BMBF-Vorhabens „Abwasserfreier Umwelt-Campus Birkenfeld“
UR	Urin
UV-Desinfektion	Ultraviolett-Desinfektion
WW	Waste water, Abwasser
WWC	Abwasser für Anaerobverfahren (Zentrat)
Z	Zentrat Flüssigphase

1 Zusammenfassung

Neuartige Sanitärsysteme (NASS) oder Ressourcenorientierte Sanitärsysteme (ROSS)² sind vor dem Hintergrund der Ressourcenverknappung, des sinkenden Wasserverbrauchs und damit einhergehender hydraulischer Probleme in unseren Abwasserkanälen sowie sich stetig ändernder Randbedingungen durch demografischen und klimatischen Wandel in den letzten Jahren immer stärker in den Fokus siedlungswasserwirtschaftlicher Betrachtungen gerückt. Wesentliche Ziele von ROSS sind die Wiedernutzung von Ressourcen (z.B. Nährstoffe, Wasser, Energie) sowie ein insgesamt nachhaltigeres Abwassermanagement. Innerhalb des Projektes wurde das Simulationstool SAmpSONS entwickelt, mit dessen Hilfe sowohl ROSS als auch konventionelle Abwassermanagementtechnologien hinsichtlich ihrer Stoff- und Ressourcenströme simuliert und auf Basis von diversen (Nachhaltigkeits-) Indikatoren bewertet und verglichen werden können. Damit soll SAmpSONS zu einer Versachlichung der Diskussionen beitragen, die zu den ROSS-Technologien oft kontrovers geführt werden.

SAmpSONS-Anwender*innen sollen insbesondere bei der Grobplanung durch eine vergleichende Bewertung verschiedener Optionen hinsichtlich der integrierten Kriterien unterstützt werden. Berücksichtigt wurden für den Vergleich Nährstoffbilanzen, ökonomische Faktoren, energetische Bilanzierung, Umweltindikatoren, Flächenbedarf der Systeme, Elimination von organischen Spurenstoffen und soziale Indikatoren. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse der Nachhaltigkeitsbewertung eine vertiefte Bewusstseinsbildung bei den Nutzer*innen (z.B. Planer*innen, Architekt*innen) sowie bei Multiplikator*innen ermöglichen. Für die diversen Verfahrensschritte von Abwasseranfall bis zur finalen Behandlung wurden eine Vielzahl von Daten-Steckbriefen entwickelt, die als Verfahrensblöcke in ein auf SIMBA#-basierendes Simulationstool überführt wurden. Nach weitgehender Fertigstellung von SAmpSONS und ersten Tests der Verfahrensblöcke wurde eine Validierung anhand von Fallbeispielen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass SAmpSONS für viele Anwendungsgebiete plausible und mit detaillierten Untersuchungen vergleichbare Ergebnisse liefert. Aufgrund der komplexen Wirklichkeit und der für SAmpSONS notwendigen Vereinfachungen, kann das ausschließliche Nutzen der in SAmpSONS hinterlegten Standard-Werte (im Folgenden auch Default-Werte) aber zu Verzerrungen und Ungenauigkeiten führen. Dies ist besonders bei Kostenauswertungen zu beachten. In diesen Fällen können sich eingearbeitete Nutzer*innen aber der Möglichkeit bedienen, die in SAmpSONS hinterlegten Default-Werte auf spezifische Anwendungsfälle flexibel anzupassen. Ein großer Vorteil von SAmpSONS zeigt sich dann in der unmittelbaren Analyse und Ergebnisauswertung auf Basis der angepassten Werte. SAmpSONS2 steht zum kostenlosen Download auf der Webseite <https://www.ifak.eu/de/produkte/sampsons> zur Verfügung.

In der Projektphase 2 wurden weitere Ergänzungen und Anpassungen an der bestehenden Version von SAmpSONS herbeigeführt. Dies umfasst die Integration zusätzlicher Technologien des Abwassermanagements, insbesondere der Schlammbehandlung, P-Rückgewinnung und von Technologien der 4. Reinigungsstufe, die Möglichkeit zur Auswertung weiterer Spurenstoffe sowie des Indikators Resilienz und die Berücksichtigung von Gutschriften für die Substitution von konventionellen Düngemitteln. Ferner wurde SAmpSONS auf Basis weiterer Fallbeispiele validiert, die Nutzer*innenfreundlichkeit von SAmpSONS, z.B. durch zusätzliche Auswertoptionen erhöht, das Tool einer erweiterten potentiellen Nutzer*innenschaft vorgestellt und dessen zukünftige

² Zuletzt hat sich der Begriff „Ressourcenorientierte Sanitärsysteme (ROSS)“ etabliert und wird im Weiteren anstelle von „Neuartigen Sanitärsystemen (NASS)“ verwendet.

Anwendung und Verstetigung vorangetrieben. Mit der vorliegenden Version von SAmpSONS2 steht ein Simulationstool zur Verfügung, das flexibel auf unterschiedlichste Abwasserinfrastrukturszenarien anwendbar ist. Das Projekt wurde von der DBU (Az 32768/01-23 und Az 35081/01-23) gefördert und von den Projektpartnern Bjørnsen Beratende Ingenieure GmbH (BCE), ifak – Institut für Automation und Kommunikation e. V., Technische Universität Berlin (TUB) und der Bauhaus-Universität Weimar (BUW) durchgeführt.

2 Einleitung

Dieser Bericht gibt einen Überblick über die Ergebnisse des Projektes SAmPSONS; welches in Projektphase 1 im August 2016 begonnen, kostenneutral bis zum 31.12.2018 verlängert wurde (kostenneutrale Laufzeitverlängerung bewilligt am 13.06.2018) und damit eine Laufzeit von 28 Monaten hatte.

Projektphase 2 begann am 01.03.2020, wurde kostenneutral um einen Monat bis zum 31.03.2021 verlängert (kostenneutrale Laufzeitverlängerung bewilligt am 03.02.2021) und hatte somit eine Laufzeit von 13 Monaten.

Am 19.12.2018 wurde bereits ein vorläufiger Abschlussbericht und am 29.03.2019 ein Abschlussbericht für Projektphase 1 eingereicht. Der finale Abschlussbericht für Projektphase 2 beruht auf dem Abschlussbericht von Projektphase 1 und enthält zusätzliche Projektergebnisse aus Projektphase 2.

Wesentliche Neuerungen und Ergänzungen aus Projektphase 2 sind im Text in BLAU hervorgehoben.

Der Simulator SAmPSONS2 steht zum kostenlosen Download auf der Webseite <https://www.ifak.eu/de/produkte/sampsons> bereit. Über das Hilfesystem des Simulators steht den Anwender*innen auch die umfangreiche Sammlung der Technologiesteckbriefe zur Verfügung.

2.1 Problemstellung und Zielsetzung

Von Seiten der Planer*innen aber auch der Genehmigungsbehörden bestehen vielfach Vorbehalte gegenüber Ressourcenorientierten Sanitärsystemen (ROSS), die häufig auf mangelnden Kenntnissen beruhen. Zwar wurden in Pilotprojekten innovative ROSS-Technologien positiv erprobt, deren gleichberechtigter Einsatz neben den konventionellen Verfahren der Abwasserableitung und -behandlung ist bislang jedoch nicht gegeben. Für die Verstetigung als Stand der Technik fehlen solide Datengrundlagen, Planungswerkzeuge sowie zu einem großen Teil auch Regelwerke.

Einen Beitrag zur Lösung dieses Sachverhaltes soll das SAmPSONS-Projekt liefern. Das im Rahmen dieses Projektes erstellte Simulations-Tool (im folgenden SAmPSONS genannt) ist in der Lage, sowohl ROSS als auch konventionelle Systeme in Hinblick auf verschiedene Kriterien zu analysieren und die Ergebnisse sowie die entsprechenden Stoff- und Ressourcenströme zu visualisieren. Dies gilt nicht nur in Bezug auf die einzelnen Technologien, sondern auch für das Zusammenwirken dieser im Gesamtsystem. Ziel von SAmPSONS ist es, die Vorauswahl von Entwässerungs- und Wiederverwendungstechnologien fallstudienspezifisch zu unterstützen. Für eine anschließende Detailplanung müssten anschließend andere, in der Anwendung komplexere, Modellierungsansätze genutzt werden.

Dabei werden folgende Kriterien berücksichtigt:

- Nährstoffbilanzen (v.a. CSB, Stickstoff und Phosphor)
- Energetische Bilanzierung
- Kostenbilanzen (fixe und variable Kosten sowie die gesamten Lebenszykluskosten)
- Umweltindikatoren
 - o Primärenergiebedarf
 - o Treibhausgasemissionen

- Eutrophierungspotenzial
- Physikalischer Fußabdruck
- Elimination von organischen Spurenstoffen bzgl. der folgenden Substanzen:
 - Diclofenac (Schmerzmittel)
 - Benzotriazol (Korrosionsschutz- und Entkalkungsmittel)
 - Iomeprol (jodiertes Röntgenkontrastmittel)
 - Metoprolol (Betablocker)
 - Sulfamethoxazol (Antibiotikum)
 - Drei weitere vom Nutzer frei definierbare Spurenstoffe
- Soziale Indikatoren (Akzeptanz, Flexibilität und Resilienz)

Zum einen werden die Anwender*innen bei der Grobplanung von Sanitärsystemen durch eine vergleichende Bewertung verschiedener potenzieller Optionen hinsichtlich der genannten Kriterien unterstützt (Visualisierung). Zum anderen sollen die Ergebnisse eine vertiefte Bewusstseinsbildung bei den o.g. Nutzer*innen sowie bei Multiplikator*innen ermöglichen.

Nutzer*innenzielgruppen für SAmPSONS sind: Planungsbüros, Architekt*innen, Fachbehörden, kommunale Entscheidungsträger*innen, Hochschulen und Zweckverbände.

2.2 Umweltrelevanz

2.2.1 Darstellung der umweltspezifischen Herausforderungen

Nach wie vor herrscht große Unsicherheit bzgl. der Umweltleistung von ROSS im Vergleich mit konventionellen Systemen der Abwasserleitung und –aufbereitung. In verschiedenen Fallstudien, in denen herkömmliche Abwassersysteme ressourcenorientierten gegenübergestellt wurden, sind für sehr spezifische Situationen und Technologien detaillierte Ökobilanzen angefertigt worden, um die Umweltwirkungen für einige wichtige Umweltindikatoren zu quantifizieren (z.B. Remy 2010; DWA 2017; Hiessl & Hillenbrand et al. 2010). Da die Ergebnisse dieser Einzelanalysen schwer auf andere Situationen übertragbar sind und die Analysen viel Zeit und Expertenwissen erfordern, wurde SAmPSONS mit der Zielsetzung entwickelt, diversen Anwender*innengruppen - ohne detaillierten Ökobilanzierungshintergrund - Aussagen über die unterschiedlichen potenziellen Umweltwirkungen verschiedener Abwasserinfrastruktursysteme unter sich ändernden Rahmenbedingungen (z.B. Anzahl angeschlossener Haushalte) zu ermöglichen.

Für die Auswertung der potenziellen Umweltwirkungen wurde in SAmPSONS auf die Methode der Ökobilanz zurückgegriffen. Die Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse ist eine systematische Evaluation der Umweltwirkungen von Produkten, Prozessen oder Dienstleistungen über den gesamten Lebenszyklus (ISO 14040, 2006). Da eine vollumfängliche Evaluation aller Systeme, Technologien und Verfahren in unterschiedlichen Skalierungen zu aufwändig und vor dem Hintergrund der SAmPSONS-Zielsetzungen nicht sinnvoll durchzuführen ist, wurde auf eine vereinfachte Evaluierung zurückgegriffen. Dabei wurde über die Auswertung von bereits durchgeführten Studien sichergestellt, dass die die Umwelt betreffenden Haupteinflussfaktoren der Systeme, z.B. der Betrieb der Anlagen (z.B. Energieverbräuche, Verbrauch von Chemikalien), die Herstellung von Materialien für die gewählten Verfahrensblöcke (z.B. Stahlbeton, Kunststoffe, Stahl, etc.) und evtl. direkte Emissionen und Transporte erfasst wurden („Wesentlichkeitsprinzip“). Ferner wurden für die Auswertung der Umweltleistung die für die Abwasserinfrastruktur wesentlichen

Umweltindikatoren ausgewählt und die dafür notwendigen Daten gesammelt. Die in SAmpSONS auswertbaren Umweltindikatoren sind:

- Treibhausgaspotenzial: Die Menge aller Treibhausgasemissionen.
Wesentliche Substanzen: CO₂, CH₄, N₂O
- Eutrophierungspotenzial: Die Menge des charakterisierten Nährstoffeintrags zu Land, Wasser und Luft.
Wesentliche Substanzen: N, P, CSB, NH₃ Emissionen
- Energieeinsatz: Angabe sowohl des Endenergiebedarfs als auch des Primärenergieeinsatzes
(erneuerbar und nicht erneuerbar)

Darüber hinaus werden in SAmpSONS ökonomische (z B. Lebenszykluskosten) und soziale (soziale Akzeptanz, Flexibilität und Resilienz) Kriterien berücksichtigt. Zudem wurden für die in SAmpSONS enthaltenen Verfahrensblöcke zu unterschiedlichen Technologien auch Daten zum physikalischen Fußabdruck (Flächenbedarf des berücksichtigten Systems) und zu organischen Spurenstoffen (Abbildung der Belastung durch ökotoxikologische Stoffe, i.e. Diclofenac, Benzotriazol, lomeprol, Metoprolol, Sulfamethoxazol) zusammengestellt.

2.2.2 Umweltrelevante Ziele (DBU-Bezug)

Das Projekt trägt einer Vielzahl der Förderziele der DBU Rechnung. Vor allem werden folgende wesentliche Kernpunkte der DBU-Förderziele behandelt:

- Förderziel 6 „Energie- und ressourcenschonende Quartiersentwicklung und –erneuerung“
 - 6.1 Die modellhafte Entwicklung und Umsetzung von innovativen Konzepten für eine energie- und ressourceneffiziente Quartiersentwicklung und –erneuerung unter Berücksichtigung sozialer Auswirkungen;
 - 6.5 Die Weiterentwicklung von Planungsmethodik, Prozessqualität und Instrumenten für eine energie- und ressourcenschonende Quartiersentwicklung;

Weiterhin lassen sich die Inhalte wie folgt in den DBU-Förderzielen wiederfinden:

- Förderziel 1 „Instrumente und Kompetenzen der Nachhaltigkeitsbewertung sowie Stärkung von Nachhaltigkeitsbewusstsein und –handeln“
 - 1.2 Entwicklung, Optimierung und Erforschung praxisgerechter Methoden und Konzepte der Nachhaltigkeitsbewertung;
 - 1.3 Maßnahmen zur Entwicklung und Stärkung von Nachhaltigkeitskompetenzen insbesondere bei Multiplikatorinnen und Multiplikatoren;
- Förderziel 9 „Kreislauffeffiziente Nutzung von Phosphor und umweltkritischen Metallen“
 - 9.4 Projekte zur Steigerung der Phosphor-Effizienz [...];
 - 9.5 die Entwicklung von Maßnahmen zur umweltgerechten stofflichen Nutzung von phosphorhaltigen Stoffströmen [...];
- Förderziel 11 „Integrierte Konzepte und Maßnahmen zu Schutz und Bewirtschaftung von Grundwasser und Oberflächengewässern“
 - 11.1 die Entwicklung und Anwendung beispielhafter Entscheidungshilfesysteme und Qualitäts- wie Quantitätsmodelle von der Betriebs- bis zur Einzugsgebietsebene;

11.2 Entwicklung und Erprobung modellhafter integrierter Lösungsansätze und Systeme sowie technischer Maßnahmen inklusive Weiterentwicklung der Anlagentechnik der Abwasserbehandlung zur Verbesserung der Gewässerqualität und zur Sicherung von Ökosystemleistungen;

Zusammenfassend betrachtet liefert das Projekt SAmPSONS Erkenntnisse bzgl. der Schließung von Stoffkreisläufen sowie einer werterhaltenden Ressourcennutzung und rationellen Effizienzsteigerung in der Nutzung der Wasserressourcen. Bzgl. der Reduktionsziele für Treibhausgasemissionen ermöglicht das Tool die näherungsweise quantitative Erfassung der mit einer Technologie verbundenen Emissionsmengen sowie den Vergleich mit den Emissionsmengen alternativer Technologien. Dadurch werden Aussagen über deren gezielte Verminderung ermöglicht (z.B. Reduktion bzw. energetische Nutzung von Methanemissionen im Abwasserbereich oder die Sequestrierung von CO₂ über die Karbonisierung von getrocknetem Klärschlamm und die Herstellung eines Klärschlammkarbonisats).

3 Hauptteil

3.1 Technologien und Behandlungsverfahren/Beschreibung der SAmpSONS-Verfahren

Beginnend mit der Recherche des aktuellen Standes der Forschung wurden unterschiedliche Vorarbeiten zusammengetragen (u.a. TWIST++, australisches Bewertungstool ESAT, SIMBA#, ECAM 2.0³) und hinsichtlich der Nutzbarkeit für das Projekt analysiert. Verschiedene Ansätze zur Systembewertung von Sanitärtechnologien und -verfahren wurden identifiziert. Diese bildeten unter anderem die Grundlage für die Indikatorenermittlung, die Auswertungsroutinen und die Ergebnisdarstellung.

Aus den Rechercheergebnissen wurden ebenfalls die zu beschreibenden Verfahren/Technologien ausgewählt, die für die erste Version von SAmpSONS berücksichtigt und für die die relevanten Daten gesammelt werden sollten. Auswahlkriterien waren neben der Nutzung in bisherig umgesetzten Modellvorhaben die Verfügbarkeit auf dem Markt. Um entsprechende Vergleiche durchführen zu können, wurden sowohl konventionelle Verfahren als auch ROSS berücksichtigt.

In der Projektphase 2 wurden für diverse weitere Technologien Daten-Steckbriefe angefertigt und in SAmpSONS2 integriert. Abbildung 1 gibt eine Übersicht der in SAmpSONS2 enthaltenen Verfahrensblöcke.

Die Daten, die zur Charakterisierung der Technologien erhoben werden sollten, wurden im Rahmen der Konzepterstellung von SAmpSONS erarbeitet.

Die Konzepterstellung bildete für die Entwicklung von SAmpSONS einen bedeutenden Abschnitt. Folgende Fragestellungen waren zu beantworten:

- Welche Zielgruppen werden angesprochen?
- Welche Anforderungen werden von Seiten der zukünftigen Nutzer*innen zu erwarten sein?
- Welches Wissen kann vorausgesetzt werden?
- Welche Ergebnisse wird das Tool liefern?

Die Ergebnisse der Konzeptphase sind in Kapitel 3.2 dargestellt.

Arbeitspaket 1 (Projektphase 1) enthält die Erarbeitung, den Test und die Verfeinerung der Verfahrensblöcke. Die Datensammlung aus Arbeitspaket 1b bildete dazu die Grundlage. Prozesskennzahlen bzw. –gleichungen fanden Eingang in die erarbeiteten Verfahrensblöcke.

Die Arbeitspakete 2b „Test der Module“ und 2c „Verfeinerung/Optimierung der Module“ sind eng mit Arbeitspaket 3 „Anwendung anhand von Praxisbeispielen/Evaluierung/Verfeinerung“ verzahnt. Als Basis mussten alle Daten-Steckbriefe in Form von Verfahrensblöcken in SAmpSONS übertragen werden; danach folgten Tests und Optimierungen der Verfahrensblöcke. Anschließend wurde mit der Evaluierung anhand von Praxisbeispielen begonnen. Die Ergebnisse sind in Kapitel 3.4 dargestellt.

In Abbildung 1 sind die über die Projektphasen 1 und 2 zusammengestellten Technologien, die in SAmpSONS2 für die Simulation genutzt werden können, dargestellt.

³ TWIST++ (Söbke et al. 2018; Sartorius et al. 2017), australisches Bewertungstool ESAT (Schulz et al. 2012), SIMBA# (ifak e.V. 2018), ECAM 2.0 (IWA et al. 2017)

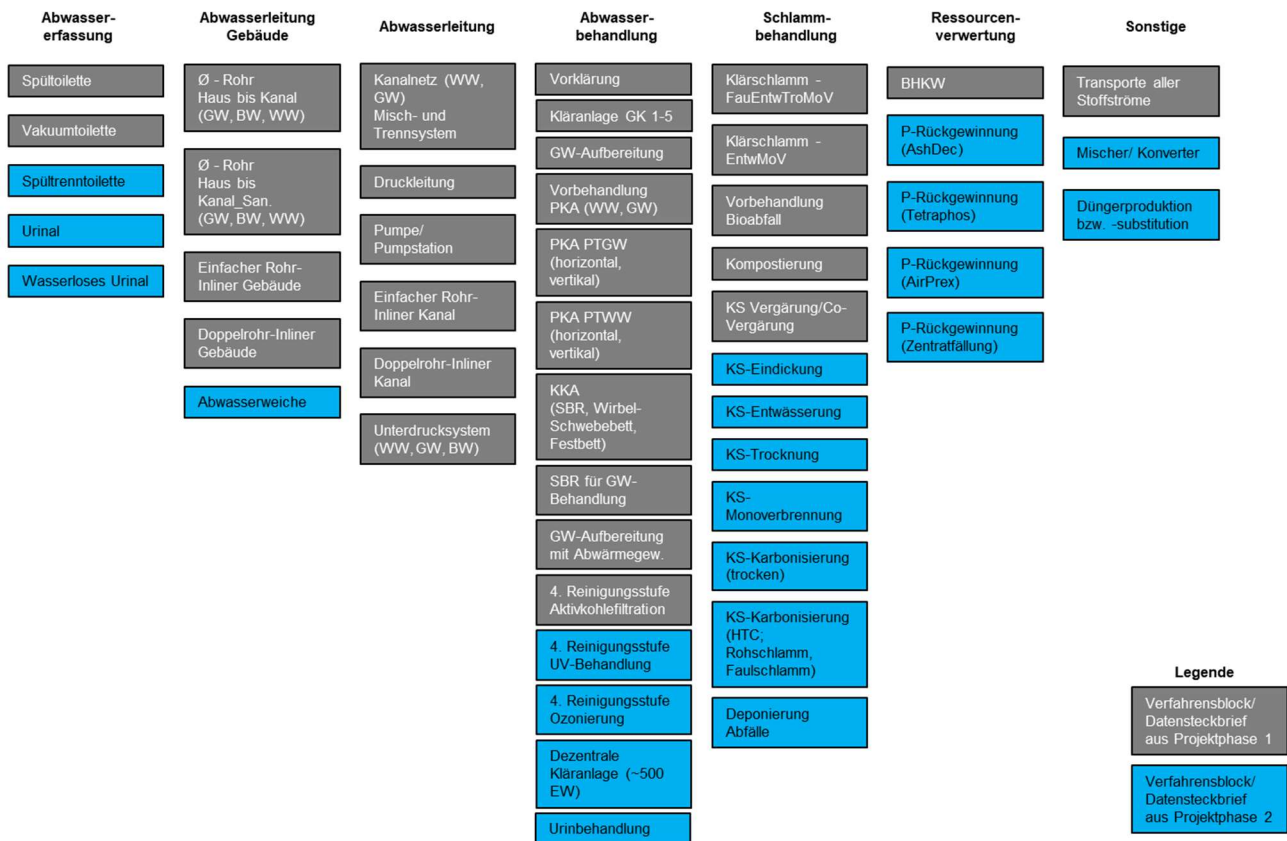


Abbildung 1: In SAmPSONS2 vorhandene Technologien.

3.1.1 Mustersteckbrief

Um die für SAmPSONS relevanten Informationen der Verfahrensblöcke erheben zu können, wurde ein Daten-Steckbrief (siehe Muster Daten-Steckbrief in Anhang C) entwickelt. Dieser wurde in Projektphase 2 entsprechend der in der ersten Projektphase gemachten Erfahrungen weiterentwickelt.

In einem allgemeinen Teil sind der Verfahrensname, ein Kurzname, eine Verfahrensbeschreibung sowie Referenzen, weiterführende Literatur und ein Verfahrensblock-Icon⁴ aufgeführt.

Es folgen Angaben zur Kapazität (z. B. in m³/d oder in Einwohnerequivalenten) des jeweiligen Verfahrens, zur Lebensdauer und zur Dimension bzw. zum Platzbedarf. Hierbei gilt, dass überbaubare Verfahren, wie zum Beispiel Kanäle, mit dem oberirdischen Platzbedarf = 0 m² ausgewiesen werden.

Im nächsten Teil folgt die Auflistung der Input- und der Output-Stoffströme für den jeweiligen Verfahrensblock. Im Teil Bilanzen, Leistungsdaten werden Reinigungsleistungen, z.B. bzgl. CSB und Nährstoffen, aber auch zur Elimination von Spurenstoffen erfasst. Im nächsten Abschnitt werden die wesentlichen benötigten Materialien für die Errichtung des Verfahrens angegeben. Darüber

⁴ Die Verfahrensblock-Icons in den Daten-Steckbriefen beruhen noch auf einer älteren Version. Die finalen SAmPSONS-Icons sind in Anhang A1 abgebildet.

hinaus werden Verbrauchsstoffe und Energieverbräuche für den Betrieb aufgelistet. Es folgt die Angabe von Emissionen, die direkt während des Betriebes des Verfahrens abgegeben werden, wie z.B. CH₄, N₂O oder NH₃.

Für die Auswertung der Kosten werden nachfolgend vom Verfahren hervorgerufene fixe (z.B. Investitionskosten) und variable Kosten (z.B. Betriebs- und Wartungskosten) sowie angenommen Lebensdauern angegeben. Im letzten Teil des Steckbriefes werden weiterführende Hinweise, nicht berücksichtigte Aspekte, Datenunsicherheiten, weitere Quellen etc. angegeben.

Nach abgeschlossener Datensammlung wurde für jeden Steckbrief ein sogenanntes Datenqualitäts-Rating durchgeführt. Dieses dient dazu, die gesammelten Daten bzgl. ihrer Qualität und Verlässlichkeit zu bewerten. Dabei wurden die in Abbildung 2 dargestellten Datenqualitäts-Kategorien entwickelt.

	Konstanten oder spezifische, vorgegebene Werte, z.B. geltend für die Größe oder Kapazität einer bestimmten Anlage
	verifizierter Wert, der auf Basis unterschiedlicher Quellen bestätigt wurde
	verlässlicher Wert, der aus einigen oder auch nur aus einer glaubwürdigen Quelle stammt (z.B. auch Herstellerangabe oder qualifizierte Expertenabschätzung)
	unsicherer Wert, der auf Abschätzungen oder Annahmen beruht (z.B. auch unsichere Quellen)

Abbildung 2: Kategorien zum Datenqualitäts-Rating

3.1.2 Abgrenzung des Bilanzraumes

SAmpSONS fokussiert auf Systeme der Abwasser- (und Bioabfallerfassung) (z.B. Toiletten, Urinale), des Abwasser- (und Bioabfalltransports) (z.B. Rohre, Kanäle, LKW) sowie der Behandlung und Verwertung der entsprechenden Stoffströme. Wie in Kapitel 3.2 erwähnt, wird bzgl. der Systemgrenze der ökobilanzielle Ansatz verfolgt, bei dem alle umweltrelevanten Emissionen in die Luft, ins Wasser oder in die Erde von der Rohstoffgewinnung bis zur Abfallverwertung erfasst werden. Der gleiche Bilanzraum wird auch für die Kostenbetrachtung sowie die sozialen Indikatoren Akzeptanz, Flexibilität **und Resilienz** gewählt. Für jeden Daten-Steckbrief, der die Datengrundlage für alle in SAmpSONS abgebildeten Technologien darstellt, sind die entsprechenden Primärdaten (z.B. Material- und Energieverbräuche) abgebildet. Diese werden mit den entsprechenden Emissionsprofilen von Hintergrunddaten kombiniert, woraus sich die Umweltwirkungen für die gewählten Indikatoren berechnen lassen. Die Hintergrunddaten wurden zum größten Teil aus der GaBi Datenbank mit geographischer Repräsentativität für Deutschland (soweit verfügbar) entnommen (THINKSTEP 2017). Analog sind für jeden Steckbrief auch die Kostenwerte (z.B. Investitions-, Instandhaltungs- und Betriebskosten) dargestellt. Ergaben sich bei der Datenerhebung z.B. für Materialverbräuche oder Kosten aus bestimmten Gründen Lücken (z.B. vernachlässigbare Umweltwirkung, geringe Kostenwirkung), so sind diese ebenfalls vermerkt (i.d.R. in den Kommentaren am Ende des Daten-Steckbriefes). Zum Teil sind die Angaben zu Kosten, Materialverbräuchen oder auch Platzbedarfen spezifisch auf die Technologie eines spezifischen Technologieanbieters ausgerichtet. Unterschiedliche Ansätze wurden ebenfalls bzgl. der Skalierung der Technologien gewählt und entsprechend in SAmpSONS umgesetzt. Die detaillierten Beschreibungen dazu finden sich in den einzelnen Daten-Steckbriefen, die im Anhang zu diesem

Bericht verfügbar sind. Es wird den Nutzer*innen von SAmPSONS dringend empfohlen, diese Informationen beim Aufbau von Abwassermanagementszenarien in SAmPSONS zu beachten, um die Nutzung nicht angemessener Werte und Fehlinterpretationen von Ergebnissen zu vermeiden. Eine Übersicht der in SAmPSONS integrierten Steckbriefe findet sich in Abbildung 1 bzw. auch gemäß der Modulbibliothek in SAmPSONS in Anhang A.

In der SAmPSONS-Version aus Projektphase 1 sind bereits diverse Substitutionseffekte und ihre entsprechenden Umweltwirkungen berücksichtigt (z.B. Einsparung von Erdgas durch Abwärmerückgewinnung oder Einsparung von Strom und Wärme durch energetische Verwertung von Biogas). Eine für ROSS-Systeme entscheidende Substitutionswirkung ist darüber hinaus die Rückgewinnung von Nährstoffen aus z.B. Gärresten oder Klärschlamm. [Die Integration dieses Nutzenpotentials war eine wichtige Erweiterung in der Projektphase 2; detaillierte Informationen dazu befinden sich im Abschnitt 3.2.4.](#)

3.1.3 Vorgehen bei der Daten-Steckbrieferstellung

Die Erstellung der Daten-Steckbriefe erfolgte im Hinblick auf die gewählten Nachhaltigkeitsindikatoren. Dafür wurden Daten für Errichtung und Betrieb (z.B. Material- oder Energieverbräuche), Bilanzen und Leistungsdaten (z.B. Reinigungseffizienzen) und Kostendaten (z.B. Investitions-, Betriebs- und Instandhaltungskosten) gesammelt. Als Ausgangspunkt für die Datensammlung diente ein Muster-Steckbrief (siehe Anhang C), der für die unterschiedlichen Verfahrensblöcke angepasst wurde. Die Erstellung der Daten-Steckbriefe erfolgte in Tabellenform. Diese tabellarischen Daten-Steckbriefe bilden die Grundlage für die in SAmPSONS integrierten Verfahrensblöcke und sind gleichzeitig Teil der Dokumentation. Sie stehen somit den Anwender*innen und der interessierten Fachöffentlichkeit im Hilfesystem des Simulators zur Verfügung.

Für die detaillierte Simulation von Abwasserprozessen werden i.d.R. komplexe dynamische Simulationswerkzeuge (z.B. SIMBA# und STOAT) benötigt. Der Ansatz für den Variantenvergleich in SAmPSONS ist bewusst anders gewählt worden, damit mit geringerem Aufwand (Datenbeschaffung, Rechenleistung) vertretbare Näherungen möglich sind. Hierzu wird insofern vereinfacht, dass nicht die komplexen dynamischen biochemischen Transformationsprozesse im Detail abgebildet werden, sondern zum Beispiel mit Hilfe konstanter Reinigungseffizienzfaktoren eine vereinfachte und statische Berechnung erfolgt, die ein überschlägiges Ergebnis liefert.

3.1.4 Erhebung der Default-Werte

Die Erhebung der Default-Werte hatte das Ziel, Daten zu ermitteln, die jeweils durchschnittliche oder repräsentative Werte von in Deutschland gebräuchlichen Technologien beschreiben. Für die Datensammlung wurden die einzelnen Technologien innerhalb des Projektkonsortiums entsprechend vorherrschender Kenntnisse und Kompetenzen verteilt. Basis der Datensammlung bildete zunächst eine umfangreiche Literaturrecherche. Neben wissenschaftlichen Publikationen und Fachliteratur dienten hier Projektberichte sowie Recherchen im Internet als Quellen. Darüber hinaus wurden Expert*innninterviews geführt und Daten von Hersteller*innen und Systemanbieter*innen gesammelt. Als Beispiel sei der Datensteckbrief für Unterdrucksysteme genannt. Auf Empfehlung eines Planungsbüros für Unterdrucksysteme wurden die oben beschriebenen Daten für zehn seit einigen Jahren im Betrieb befindliche

Unterdruckentwässerungssysteme auf Fehmarn gesammelt und ausgewertet. Es handelt sich dabei somit um reale Primärdaten, die nur an einigen Stellen mithilfe von Annahmen beziehungsweise Referenzen aus der Literatur ergänzt werden mussten. Generell lag bei der Datensammlung die Priorität auf möglichst praxisnahen Werten. Diese wurden wiederum mit wissenschaftlichen Quellen (sofern verfügbar) verglichen, um sie auf ihre Plausibilität zu prüfen. Auf Grund der zeitlichen Beschränkungen wurde die Datensuche bei jedem Daten-Steckbrief in Abhängigkeit von der Komplexität nach einer bestimmten Zeit abgebrochen. In diesem Fall erfolgte eine Abschätzung des Wertes durch einen Experten. Sofern dies nicht möglich war, wurde der Wert (anhand der verfügbaren Daten) durch den Bearbeiter selbst abgeschätzt und als unsicher vermerkt. Siehe dazu auch die Ausführungen zum Datenqualitäts-Rating in Kapitel 3.1.1.

Für die Entwicklung von SAmPSONS war es notwendig, Werte für alle Datenpunkte festzulegen. Ein ganz entscheidendes Element von SAmPSONS ist die Möglichkeit, dass die Nutzer*innen – bei genauerem Kenntnis spezifischer Daten (z.B. Energieverbrauch eines Systems oder Kosteninformationen) – diese in SAmPSONS anpassen können. Auf diese Weise ist das Tool auch für veränderte Rahmenbedingungen nutzbar.

Im Verlauf der Datensammlung zeigte sich, dass die Definition von Default-Werten zum Teil mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden war.

Die Schwierigkeiten bei der Datensammlung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- In einem Daten-Steckbrief werden teilweise Technologien, die sehr unterschiedlich ausgestaltet sind, zusammengefasst, z.B. unterschiedliche Behandlungsverfahren in Kläranlagen. Die Schwankungsbreite der Werte ist dementsprechend erheblich. Dies stellt ein generelles Dilemma bei der Abbildung komplexer Sachverhalte dar: Nutzer*innenfreundlichkeit und Verständlichkeit auf der einen und Genauigkeit und Detailtiefe auf der anderen Seite. Diesem Spannungsfeld wurde innerhalb der Projektphase 2 von SAmPSONS insofern begegnet, als dass zusätzliche Verfahren integriert wurden (siehe Abbildung 1). Zudem ist im Rahmen eines Verstetigungsprozesses geplant, SAmPSONS2 auch zukünftig weiter zu erweitern, siehe Kapitel 3.3.1 und 3.3.2.
- Zum Teil bestehen noch erhebliche Datenlücken zu bestimmten Sachverhalten, zu denen noch weiterführende Forschung notwendig ist und die das Konsortium im Rahmen von Projektphase 1 von SAmPSONS nicht füllen konnte. Dies gilt beispielsweise für die Reinigungsleistung von Abwasserbehandlungsanlagen für organische Spurenstoffe (siehe dazu auch Kapitel 3.4.4). Der Fokus der SAmPSONS-Entwicklung in Projektphase 1 lag darauf, zunächst eine funktionsfähige Version des Auswertetools zu schaffen, um den avisierten umfassenden Vergleich zwischen unterschiedlichen Technologien vorzubereiten. [In Projektphase 2 wurde zur bereits integrierten Substanz Diclofenac sowie zu vier weiteren organischen Spurenstoffen und den über unterschiedliche Technologien zu erwartende Reinigungsleistungen eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, siehe dazu Kap. 3.2.2.2. Die Ergebnisse der Recherchen wurden für SAmPSONS2 für jeden Verfahrensblock analysiert und entsprechende Default-Werte zum Abbau bzw. Elimination der einzelnen Spurenstoffe eingetragen.](#)
- Besonders herauszustellen sind auch die Datenunsicherheiten bzgl. der K- und S-Bilanzen sowie die Direktmissionen für die einzelnen Verfahren. Häufig sind dafür weder von Technologieanbieter*innen noch in der Literatur robuste Informationen zu finden.

- Somit bleibt festzuhalten, dass mit den in SAmpSONS integrierten Werten noch erhebliche Unsicherheiten verbunden sind. Nutzer*innen können sich über die detaillierten Angaben in den Daten-Steckbriefen, den hinterlegten Referenzen, getroffenen Annahmen und der Kennzeichnung der Datenqualität ein eigenes Bild zur Verlässlichkeit der zugrundeliegenden Default-Werte verschaffen.
- Einige abgeschätzte Werte sind mit Vorsicht zu behandeln, da sie nicht hinreichend verifiziert sind. Diese Werte wurden als unsichere Werte vermerkt. In Projektphase 2 wurden nicht nur weitere Technologien in SAmpSONS integriert, sondern es wurden auch weitere Fallbeispiele aufgebaut und ausgewertet (siehe Kap. 3.4.7 - 3.4.8). Die damit verbundene Erprobung von SAmpSONS hat das Vertrauen der mit SAmpSONS2 erzeugten Ergebnisse weiter erhöht. Es wäre allerdings wünschenswert, weitere Nutzer*innen für die Anwendung von SAmpSONS zu gewinnen, um die Plausibilität der Ergebnisse zu schärfen. Es sei zusätzlich darauf hingewiesen, dass zu jedem Datenpunkt die Referenzen im Daten-Steckbrief vermerkt sind, so dass die Nutzer*innen in die Lage versetzt werden, die zugrundeliegenden Annahmen nachzuvollziehen. Auch hier gilt, dass in SAmpSONS bei Verfügbarkeit von exakteren bzw. auf die spezifische Situation passenderen Daten, die Default-Werte angepasst werden können. Generell wird für die in SAmpSONS enthaltenen Daten und für die mit SAmpSONS erzielten Ergebnisse keine Gewähr übernommen.

3.1.5 Skalierung

Die Ausführungen zur Skalierung in SAmpSONS beschreiben die Anpassungen der Kosten sowie der Material-, Energie-, oder Flächenverbäuche an unterschiedliche Mengen von Stoffströmen bzw. Einwohnerwerte. Einige der Ergebnisse in SAmpSONS hängen direkt von der verarbeiteten Menge in der jeweiligen Technologie bzw. der angeschlossenen Einwohnerzahl ab, wie beispielsweise der Energieverbrauch pro m³ behandelten Abwasser. Solche variablen Material-, Energie- oder Kostenströme sind in Bezug auf die Skalierung unproblematisch. Im Gegensatz dazu sind in der Regel die mit der Errichtung der Anlage verbundenen fixen Aufwendungen wie Investitionskosten, Materialien für die Errichtung und Flächenbedarf unabhängig von der tatsächlich angeschlossenen Einwohnerzahl bzw. der tatsächlichen Zuflussmenge. Sie hängen dagegen davon ab, für welche Kapazität (geplante Zahl der angeschlossenen Einwohner*innen, geplante Analgenkapazität) die Anlage geplant und ausgelegt ist. Insbesondere bei Anlagen, in denen große Mengen von Stoffströmen behandelt werden, wie den großen Kläranlagen oder der Klärschlammmonverbrennung, ergab sich daraus in SAmpSONS folgende Herausforderung: Einerseits sollen diese großen Anlagen möglichst realistisch abgebildet werden. Andererseits soll es möglich sein, auch Sanitärsysteme für kleinere Siedlungen abzubilden, die an eine solche, ggf. bereits bestehende, Anlage angeschlossen werden. Diesen kleineren Siedlungen sollen dann jedoch nicht die gesamten mit der Errichtung der großen Anlage verbundenen Aufwendungen angerechnet werden. Zur Verdeutlichung ein Beispiel: Eine Siedlung mit 300 EW wird an eine bestehende Kläranlage GK 5 angeschlossen mit einer Kapazität von 100.000 EW. Die Investitionskosten von beispielsweise 20 Mio. € sollen nun nur anteilig (beispielsweise mit einem Anteilfaktor von $300/100000 = 0.003$) für diese kleine Siedlung in SAmpSONS ausgewiesen werden, also lediglich 60.000 €. Für einzelne Technologien (z. B. Kanalnetz, Kläranlage) kann dieser Anteilfaktor direkt eingegeben werden, bei anderen Technologien (z. B. HTC, VUNA) kann dies in den Parametern der Kostenfunktion berücksichtigt werden.

Wie an diesem Beispiel deutlich wird, beruhen alle in den Daten-Steckbriefen beschriebenen Verfahren und damit auch die Default-Werte der in SAmPSONS integrierten Verfahren auf einer bestimmten Kapazität, die den jeweiligen Steckbriefen entnommen, aber von Nutzer*innen verändert werden kann. Für diese Kapazität ist die Genauigkeit bzw. die Repräsentativität der Daten am höchsten. Um eine gewisse Flexibilität für unterschiedliche Szenarien zu gewährleisten, sind die Annahmen für die Skalierung (wie im obigen Beispiel beschrieben) meist linearer Natur (und in der Regel pro Bezugsgröße, wie z. B. EGW, Design-Zulaufmenge oder Design-Zulaufkraft pro Zeiteinheit, beschrieben). Dadurch ist es möglich, in SAmPSONS auch den Anschluss von (kleineren) Siedlungen an (größere) Technologien zu modellieren. Damit verbunden ist zwar eine höhere Flexibilität, aber auch eine erhöhte Unsicherheit, die die Nutzer*innen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigen sollten. Darüber hinaus bestehen für einige Verfahren aus Wirtschaftlichkeitsgründen Mindestkapazitäten. Eine Unterschreitung dieser Mindestkapazitäten führt in SAmPSONS zu einer Warnmeldung.

Für einige der Technologien sind in den Steckbriefen Angaben zu unterschiedlichen Kapazitäten (Anlagengrößen) zu finden. Ein Beispiel hierfür sind Investitionskosten für unterschiedliche Kapazitäten bei Kläranlagen sowie den P-Rückgewinnungsverfahren AshDec und TetraPhos.

3.2 Konzepterstellung und Simulation

3.2.1 Zielsetzung

Als Grundlage für die Erarbeitung der Simulationsmodule und als Entwicklungsumgebung diente das offene Simulationssystem für algebraische, zeitdiskrete und zeitkontinuierliche dynamische Systeme SIMBA# (OGUREK ET AL., 2015), welches von allen Partnern zur Erarbeitung von Modulen genutzt wurde. Hieraus wurde das eigenständige Simulationstool SAmPSONS erstellt. SAmPSONS ist ein frei verfügbares Programm, das kostenlos im Internet zum Download zur Verfügung steht.

Für das vorliegende Forschungsprojekt wurde bewusst nicht auf detaillierte Modellierungsansätze (wie z.B. die Activated Sludge Models der IWA, HENZE ET AL., 2000) zurückgegriffen, die in ihrer Komplexität und Parametervielfalt weit über dem für SAmPSONS notwendigen Detailierungsgrad liegen. Stattdessen wurde mit stark vereinfachten Modellierungsansätzen, die ihrerseits wiederum mit Ansätzen aus der Lebenszyklusanalyse gekoppelt sind, gearbeitet. Auf erste vielversprechende Vorarbeiten konnte hierbei aufgesetzt werden (CAMPOS ET AL., 2012, ORMANDZHIEVA ET AL., 2014). Insgesamt wurden bedarfsgerechte Ansätze gewählt, die über Ansätze mit einfachen Transferkoeffizienten, wie sie in der Lebenszyklusanalyse üblich sind, weit hinausgehen, da viele Prozesse in der Abwasserreinigung, aber auch Kostenfunktionen, nichtlinearer Natur sind.

3.2.2 Aufbau des Simulators

Für die Erarbeitung des SAmPSONS-Simulators wurden folgende fünf notwendige Schritte durchgeführt:

3.2.2.1 Definition der relevanten Stoffströme:

Die Abbildung der Stoffströme dient zum einen der Veranschaulichung (z. B. Trinkwasser, Abwasser, Schlamm usw.), zum anderen auch der Vermeidung unzulässiger Kopplung von Modulen (z. B. mehrfach hintereinander geschaltete Kläranlage). Die Definition erfolgte in Anlehnung an TILLEY *ET AL.* (2014). Als Komponenten des Stoffstromvektors der wasserbezogenen Kriterien wurden CSB, N, P, K, S sowie ausgewählte Spurenstoffe identifiziert. Nachdem in Projektphase 1 eine Beschränkung auf Diclofenac erfolgte, [erfolgte in Projektphase 2 eine Erweiterung um vier weitere Spurenstoffe, sowie um die Option für den Nutzer, drei weitere Spurenstoffe berücksichtigen zu können.](#) Hierzu wurden in Phase 2 die in Phase 1 erstellten Module um die zusätzlichen Stoffe erweitert und die in Phase 2 hinzugekommenen Module auf diesen neuen Stoffstromvektor ausgelegt. Ebenso erfolgte in Phase 2 die konsequente Berücksichtigung von oTS und TS, was eine verbesserte Darstellung des Schlammhaushaltes sowie der aus dem Schlamm erzeugbaren [Biogasmenge erlaubt.](#) Zusätzlich erfolgten Festlegungen für gas- und schlammbezogene Stoffströme. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt eine Übersicht über die in SAmPSONS integrierten Stoffströme.

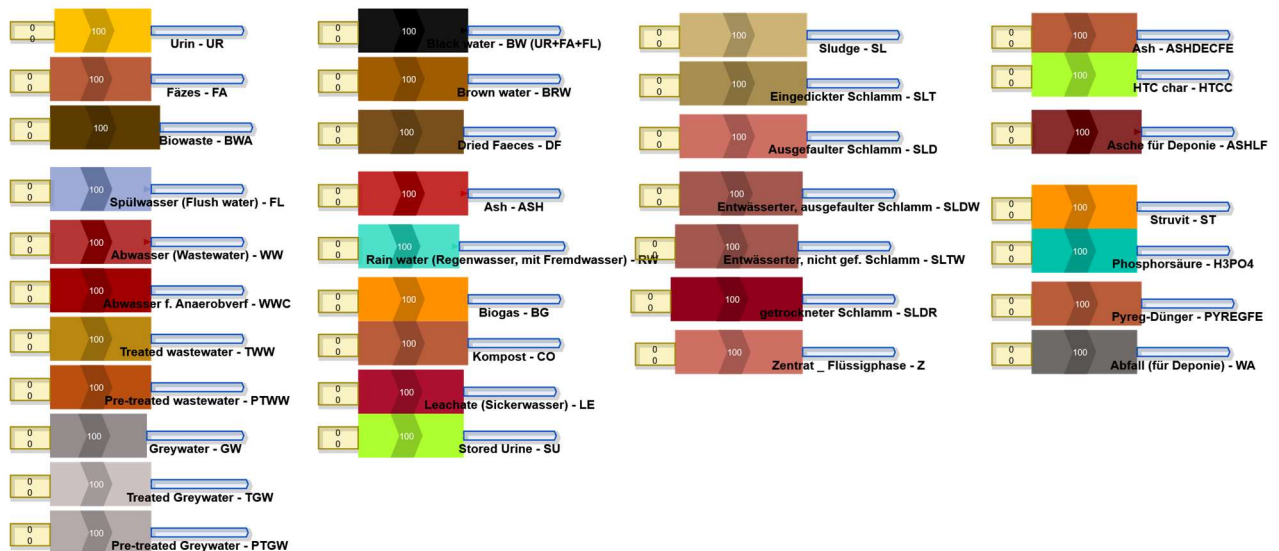


Abbildung 3: In SAmPSONS betrachtete Stoffströme

3.2.2.2 Definition von Auswerteindikatoren:

Für die angestrebten Auswertungen wurden qualitative und quantitative Indikatoren identifiziert und in den Daten-Steckbriefen mit entsprechenden Bewertungen bzw. Berechnungsvorschriften versehen, die dann programmtechnisch umgesetzt worden sind. Eine Übersicht der in SAmPSONS integrierten Auswerteindikatoren ist in Abbildung 4 dargestellt.

Nachhaltigkeitsdimension	Name Indikator	Beschreibung	Messgröße/-verfahren
Ökologie	Eutrophierungspotential (EP)	Menge des charakterisierten Nährstoffeintrags zu Land, Wasser und Luft. Wesentliche Substanzen, die zu EP beitragen: N, P, COD, NH3 Emissionen	kg PO4-Äquivalente
	Energieeinsatz	Angabe sowohl des Endenergiebedarfs als auch des Primärenergieeinsatzes	MJ
	Treibhausgasemissionen (THG)	Menge aller Treibhausgasemissionen. Wesentliche Substanzen: CO2, CH4, N2O	kg CO2-Äquivalente
	Organische Spurenstoffe / Arzneimittelrückstände	Belastung ökotoxikologischer Stoffe wird über fünf organische Spurenstoffe abgebildet: - Diclofenac - Benzotriazol - lomeprol - Metoprolol - Sulfamethoxazol	Prozentuale Eliminations- bzw. Rückhaltewirkung
	Physikalischer Fußabdruck	Angabe des Flächenbedarfs des berücksichtigten Systems	m2
Ökonomie	Lebenszykluskosten	Ökonomische Wirkung des definierten Szenarios. Ausweis diverser Kosten und Erlöse	€ einzeln und als "net present value"
Soziales	Soziale Akzeptanz	Qualitativer Indikator zur Bewertung der Akzeptanz eines definierten Systems auf relevante Stakeholder. Bewertungsmethode könnte Punkte wie Komfort, Bedienbarkeit, etc. abbilden	Bewertungsskala
Technik	Flexibilität	Flexibilität hinsichtlich sich ändernder Randbedingungen, basierend auf drei Faktoren: Restbuchwert, Beeinträchtigungspotenzial, Rest Graue Energie	Berechnungsalgorithmus
	Resilienz	Anpassungsfähigkeit eines Systems an sich ändernde Umstände; Bewertung auf Basis Systemebene (Resilienz des Gesamtsystems) und Komponentenebene (Resilienz der einzelnen Komponenten des Systems)	Berechnungsalgorithmus

Abbildung 4: Übersicht der in SAmPSONS integrierten Auswerteindikatoren.

Bei der Auswahl der Bewertungsindikatoren für SAmPSONS wurden folgende Grundprinzipien festgelegt:

- Bzgl. der Anzahl und Auswahl der Bewertungsindikatoren galt es zwei gegensätzliche Zielrichtungen zu bedienen: zum einen sollen die unterschiedlichen Nachhaltigkeitswirkungen Berücksichtigung finden, um eventuelle Zielkonflikte, z.B. zwischen Umweltwirkung und Kosten oder zwischen Menge der Treibhausgasemissionen und dem Eutrophierungspotenzial sichtbar zu machen. Zu diesem Zweck wurde eine Liste von Indikatoren erarbeitet, die die drei wesentlichen Dimensionen der Nachhaltigkeit (Ökonomie, Ökologie und soziale Faktoren) in geeigneter Weise abbildet. Zum anderen sollte eine zu große Anzahl von Indikatoren die Bewertung der von SAmPSONS-Nutzer*innen

definierten Szenarien nicht zu schwierig gestalten. Darüber hinaus bedeuten zusätzliche Auswerteindikatoren in den meisten Fällen auch zusätzlichen Datenbedarf und Datensammelaufwand. Daher galt folgendes Grundprinzip: „so viele Indikatoren wie nötig und so wenige Indikatoren wie möglich“.

- Bei der Auswahl der Bewertungsindikatoren galt es des Weiteren diejenigen zu definieren, die die wesentlichen Umweltwirkungen von Abwasserbehandlungssystemen widerspiegeln und die zudem die wesentlichen Unterschiede zwischen konventionellen und ressourcenorientierten Sanitärsystem aufzeigen. Im Zuge der Weiterentwicklung von SAmpSONS in Projektphase 2 wurden zunehmend auch Technologien in SAmpSONS integriert, bei denen thermische Behandlungs- bzw. Verwertungsverfahren von Stoffströmen abgebildet wurden (z.B. die Karbonisierung von getrocknetem Klärschlamm oder die hydrothermale Karbonisierung (HTC)). Von diesen Technologien gehen einige umweltrelevante Emissionen aus, die nicht über die für SAmpSONS definierten Umweltindikatoren erfasst werden. Z.B. entstehen bei der Karbonisierung von Klärschlamm CO- oder SO₂-Emissionen oder bei der HTC-Technologie Dioxine und Furane (Türk et al., 2013), die über die Umweltindikatoren photochemisches Oxidantienbildungspotential (CO) oder Versauerungspotential (SO₂) bzw. andere Umweltindikatoren (Dioxine, Furane) abgebildet werden. Eine Berücksichtigung dieser weiteren Umweltindikatoren hätte großen zusätzlichen Aufwand sowohl bei der Datensammlung als auch bei der Integration in SAmpSONS bedeutet, was im Rahmen der Förderung von Projektphase 2 nicht leistbar war. Ferner widerspricht es einem wesentlichen Grundsatz des SAmpSONS-Tools, dass die Nutzer*innen mit der Anzahl der auswertbaren Indikatoren nicht überfrachtet werden sollten. Es ist daher aber wichtig, dass sich die Nutzer*innen von SAmpSONS über die Auslassung dieser spezifischen potentiellen Umweltwirkungen bewusst sind und diese bei detaillierteren Bewertungen von spezifischen Abwassermanagementszenarien mit einbeziehen.
- Ein weiteres Prinzip bei der Auswahl der Bewertungsindikatoren war die Quantifizierbarkeit der entsprechenden Nachhaltigkeitswirkungen. Gerade vor dem Hintergrund, dass Vertreter von ressourcenorientierten (und konventionellen) Abwasserentsorgungssystemen häufig von vermeintlichen Vorteilen sprechen, worüber es aber oft keine klaren (messbaren) Fakten gibt, soll diese „Datenlücke“ mit der Entwicklung von SAmpSONS geschlossen werden. Bei der Quantifizierbarkeit der den Indikatoren innewohnenden Bewertungsmethoden wurden solche gewählt, deren Quantifizierungslogik robust und akzeptiert ist.

Im Folgenden werden die Auswerteindikatoren in SAmpSONS beschrieben:

- **Eutrophierungspotenzial (EP):** Ein wichtiger Indikator zur Beschreibung der Umweltwirkungen, insbesondere von Abwassersystemen, stellt das Eutrophierungspotenzial dar. Unter Eutrophierung bzw. Nährstoffeintrag versteht man eine Anreicherung von Nährstoffen, in erster Linie in Form von Stickstoff- und Phosphorverbindungen. Das Eutrophierungspotenzial wird in Phosphat-Äquivalenten (PO₄-äq.) angegeben. Dies bedeutet, dass alle Emissionen bezüglich ihres potenziellen Eutrophierungspotenzials zu PO₄ ins Verhältnis gesetzt werden.
- **Energieeinsatz:** Ein relevanter Indikator im Rahmen der ökologischen Bewertung von Produktsystemen stellt der Einsatz von Energie dar. Für SAmpSONS sollen drei Indikatoren zum Energieeinsatz ausgewertet werden

- a) Der **kumulierte Stromverbrauch** aller Verfahrensblöcke innerhalb eines von SAmpSONS-Nutzer*innen definierten Systems (ausgewiesen in kWh). Der Stromverbrauch gilt als wesentliche Steuerungsgröße insbesondere bei Abwasserbehandlungstechnologien.
- b) Der **Wärmebedarf bzw. -ertrag** aller Verfahrensblöcke innerhalb eines von SAmpSONS-Nutzer*innen definierten Systems (ausgewiesen in kWh). Der Wärmebedarf bzw. -ertrag spielt gerade bei in Projektphase 2 integrierten Verfahrensblöcken (z.B. Trocknung, Monoverbrennung oder Karbonisierung von Klärschlamm) eine wichtige Rolle.
- c) Der **Primärenergieeinsatz**: Er beschreibt die Menge an direkt aus der Hydrosphäre, Atmosphäre oder Geosphäre entnommenen Energie oder Energieträger, die noch keiner anthropogenen Umwandlung unterworfen wurde.

Es ist zu beachten, dass Strom bzw. Wärmebedarfe Teile des Primärenergieeinsatzes ist und nur als transparente Informations- bzw. Steuerungsgrößen in SAmpSONS separat ausgewiesen werden.

- **Treibhausgasemissionen (THG)**: Ein wesentlicher Indikator zur Beschreibung der Umweltwirkungen stellt das Treibhauspotenzial dar. Durch die Emissionen von Substanzen wie Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) oder Lachgas (N₂O) wird der natürliche Treibhauseffekt auf dem Planeten Erde verstärkt. Das Treibhauspotenzial wird in Kohlendioxid-Äquivalenten (CO₂-äq.) angegeben. Dies bedeutet, dass alle Emissionen bezüglich ihres potenziellen Treibhauseffekts zu CO₂ ins Verhältnis gesetzt werden.
- **Organische Spurenstoffe / Arzneimittelrückstände**: Spurenstoffe werden auch als Mikroverunreinigungen oder Mikroschadstoffe bezeichnet und sind im Wasser in der Luft oder anderen Stoffen in geringen Konzentrationen vorhanden. Der Bestandteil beträgt meist Mikro- oder Nanogramm (10⁻⁶ bis 10⁻⁹ Gramm). Organische Spurenstoffe sind durch eine C-Kette und i.d.R. dazugehörigen Wasserstoff gekennzeichnet. Mikroplastik findet derzeit noch keine Berücksichtigung in SAmpSONS, da die Datengrundlage aktuell noch zu gering ist. Nachdem Diclofenac schon in der ersten Version von SAmpSONS unterstützt wurde, enthält SAmpSONS2 die folgenden Spurenstoffe als Indikatoren: Benzotriazol, Iomeprol als Vertreter für iodhaltige Röntgenkontrastmittel, Metoprolol und Sulfamethoxazol. Diese Spurenstoffe werden durch SAmpSONS2 unterstützt, indem für alle Stoffströme ihre Konzentrationen und für alle Behandlungsverfahren ihre Abbauraten hinterlegt sind. Bei der Ermittlung von Werten für Konzentrationen und Abbauraten wurden je nach Quellenlage stark unterschiedliche Konzentrationen gefunden, so dass der hinterlegte Default-Wert nicht immer zutreffend sein mag. Aus diesem Grunde wurden alle gefundenen Quellen in einem Tabellenkalkulationsarbeitsblatt zusammengefasst und SAmpSONS2 zur Orientierung der Benutzer*innen hinzugefügt.
- **Physikalischer Fußabdruck (Flächenbedarf)**: Auf Basis dieses Indikators wird die reine Fläche berücksichtigt, die benötigt wird, um die beschriebene Technologie aufzustellen und zu betreiben. Hierzu zählen alle Bestandteile der Technologie, die für den direkten Betrieb der Anlage notwendig sind. Die Anlagen zur Erzeugung, der für den Betrieb des Verfahren benötigten Energie und Wasser, zählen (auch anteilig) nicht dazu. Lagerplätze für Betriebsmittel (z.B. Fällmittel, Flockungsmittel) vorzuhalten, zählen hingegen mit zum Flächenbedarf. Überbaubare Verfahren, wie zum Beispiel Kanäle, werden mit dem oberirdischen Flächenbedarf = 0 m² ausgewiesen.

- **Lebenszykluskosten:** Zur Bewertung der ökonomischen Dimension von konventionellen und ressourcenorientierten Abwassermanagementtechnologien wird der Ansatz der Lebenszykluskosten herangezogen. Die Nutzer*innen von SAmPSONS haben darüber hinaus die Möglichkeit, schon in der Vergangenheit getätigte Investitionen zu bemessen und als „versunkene Kosten = sunk costs“ in SAmPSONS zu berücksichtigen. In SAmPSONS werden einzelne Kostenkomponenten, z.B. Investitionskosten für Anschaffung, Planung, Bau und Inbetriebnahme sowie Betriebskosten für Energieverbräuche und Instandhaltung (soweit vorhanden) auch getrennt angegeben und ausgewertet. [Optional können Investkosten in der Berechnung mit einem jährlichen Zinssatz belegt werden.](#)
- **Soziale Akzeptanz:** Der Auswertendikator „Soziale Akzeptanz“ erfasst die Akzeptanz eines Sanitärsystems durch die Bürger*innen. Grundsätzlich fließen in diesen Auswertendikator Faktoren ein wie notwendige Betreuungszeit durch die Bürger*innen, Notwendigkeit der Betreuungsinitiative durch die Bürger*innen, benutzerbezogener Platzbedarf, Ausfallanfälligkeit, subjektive Gefährdung, Umwelt-Image, Ästhetik, Geruchs-Emissionen, Geräusch-Emissionen, Bio-Emissionen, Bezahlbarkeit im Allgemeinen und Bezahlspitzen im Speziellen. Um jedoch nicht für jeden dieser möglicherweise kontextsensitiven Faktoren einen Wert bereitzustellen, werden diese Faktoren im Sinne einer Checkliste in einem von Nutzer*innen zu definierenden dreistufigen Wert zusammengefasst. Pro Systemkomponente müssen die Nutzer*innen zwischen 1 – Abweichung zum Negativen, 2 – keine Abweichung von der Norm und 3 – Abweichung zum Positiven wählen. Die festgelegten Werte werden gemittelt und zu einem Gesamtwert aggregiert.
- **Flexibilität:** Im Rahmen von SAmPSONS wird auf die Definition von Flexibilität als die Anpassungsfähigkeit an sich ändernde Umstände zurückgegriffen. Beispiele sich ändernder Umstände mit Einfluss auf Sanitärsysteme sind Preisentwicklung für Energie und Rohstoffe, Demographie oder Klimaänderungen. Für den Auswertendikator Flexibilität werden drei Faktoren in einem Berechnungsalgorithmus herangezogen:
 - d) Der **Restbuchwert** ist relevant, da er aus ökonomischer Sicht ein Maß für Flexibilität ist. Hohe Restbuchwerte erschweren Systemänderungen.
 - e) Das **Beeinträchtigungspotenzial** von Systemänderungen für die Nutzer*innen ist aus sozialer Sicht ein Maß für Flexibilität. Änderungen auf der Kläranlage bleiben für die Nutzer*innen weitestgehend ohne direkte Beeinträchtigung, während der Einbau einer Vakuumtoilette zum einen die Benutzer*innen sowohl durch die Baumaßnahmen in der unmittelbaren Lebensumgebung beeinträchtigt als auch zum anderen als Änderung der „Nutzerschnittstelle“ des Sanitärsystems für eine gewisse Zeit für die Nutzer*innen erfahrbar bleibt.
 - f) Steht der Restbuchwert für die ökonomische Flexibilität eines Systems, so kann durch den Einsatz an Material- und Energie für die Erstellung der Komponente die ökologische Flexibilität gefasst werden. In Analogie zum Restbuchwert wird die „**Rest-Graue Energie**“ genutzt, um auszudrücken, wieviel der schon aufgewendeten Grauen Energie bei einer Systemänderung „ohne Nutzung bleibt“.
- **Resilienz:** [Mit Resilienz bezeichnet man in der technischen Infrastruktur das Vermögen eines Infrastruktursystems, bei Störungen oder Komponentenversagen nicht vollständig auszufallen, sondern wesentliche Systemfunktionen beizubehalten. In der Literatur konnten keine umfassenden Metriken zur Ermittlung der Resilienz eines Wasserinfrastruktursystems gefunden werden. Insbesondere als herausfordernd stellte sich der in SAmPSONS](#)

vorliegende hohe Abstraktionsgrad der zu bewertenden Systeme dar. Für einzelne Komponenten lassen sich Resilienzmetriken auf allerdings sehr detailliertem Niveau mit hohem Datenbedarf finden. Dieser detaillierte Datenbedarf kann allerdings für den SAmpSONS-Anwendungsfall der Vorplanung nicht erfüllt werden. Entsprechend wurde eine eigene Metrik zur Bestimmung der Resilienz eines Wasserinfrastruktursystems in SAmpSONS entwickelt (Abbildung 5). Die Metrik verknüpft verschiedene Kennzahlen miteinander. Es wird zwischen einer Systemebene und einer Komponentenebene unterschieden. In die Ebenen gehen jeweils mehrere Kennzahlkomponenten ein, die jeweils auf das Intervall [0; 1] normiert sind:

- **Systemebene:** Kennzahl für die abstrakte Resilienz eines Systems
 - **Flexibilitätsbeiwert:** Grundannahme: Im Störfall muss sich das System auch wieder erholen. Erholung ist umso einfacher, je höher die Flexibilität ist.
 - **Komplexitätsbeiwert:** Grundannahmen: Hohe Komplexität eines Systems ist der Resilienz abträglich und hohe Komplexität eines Systems liegt dann vor, wenn es viele Knoten (z.B. Reaktoren) und Kanten (Leitungen) gibt.
 - **Redundanzbeiwert:** Grundannahme: Identische Knoten sorgen für Redundanz, die in höhere Resilienz resultiert.
- **Komponentenebene:** Verknüpfung der Resilienz Kennzahlen für die unterschiedlichen Komponenten in einem System
 - **Parameter Resilienz:** Steckbrief-bereitgestellter Wert, der vom Benutzer überschrieben werden kann und dadurch detaillierte und genaue Resilienz betrachtungen der jeweiligen Komponente zulässt.
 - **Kapazitätsbeiwert:** Grundannahme: Bei nicht ausgelasteter Kapazität ist die Systemfunktionalität besser einzuhalten

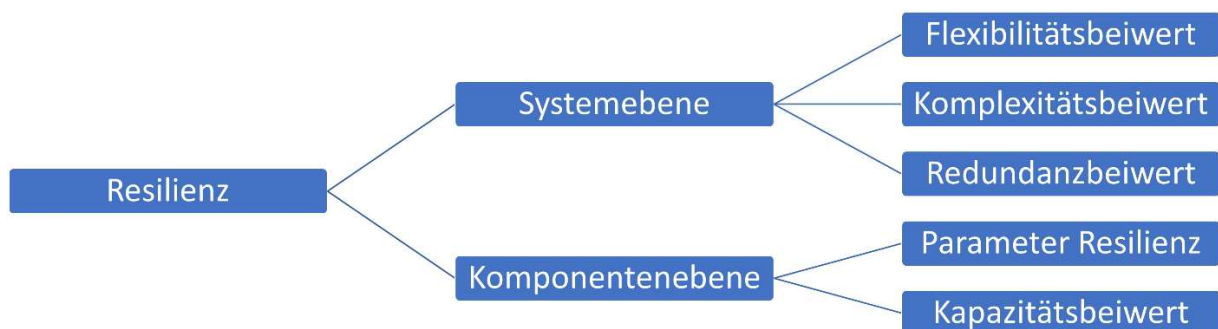


Abbildung 5: Berechnungsschema zur Ermittlung des Indikatorwertes „Resilienz“.

Abbildung 6 fasst den Berechnungsalgorithmus zusammen. Die Ergebnisausgabe von SAmpSONS enthält neben dem Wert der Resilienz des Gesamtsystems auch die wesentlichen Zwischenergebnisse.

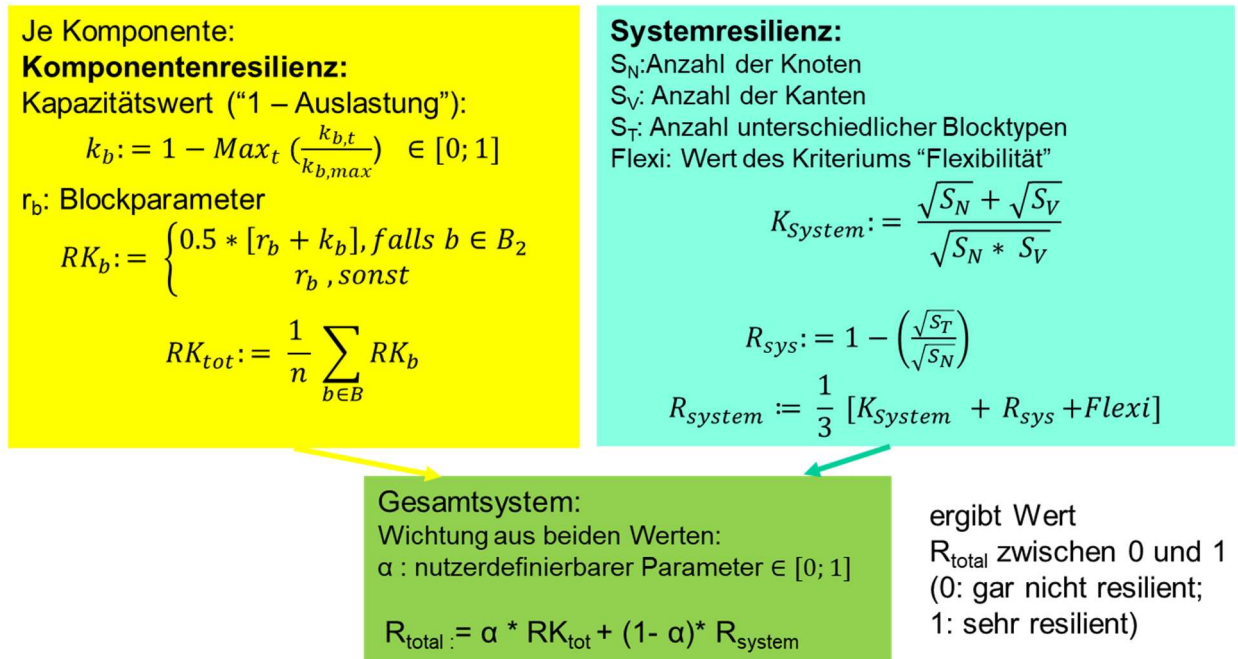


Abbildung 6: Berechnungsalgorithmus zur Ermittlung des Indikatorwertes „Resilienz“.

Der Algorithmus zur Berechnung der Werte für den Parameter Resilienz kann aufgrund seines hohen Innovationsgrades noch nicht als abschließend gesetzt betrachtet werden, sondern gibt ungefähre Werte vor. Die Implementierung in SAmPSONS hilft vielmehr, für dieses herausfordernde Thema hoher Wichtigkeit zur Bewertung von Infrastruktursystemen Werte zu erheben, die die weiterlaufende Forschung an einer verbesserten Metrik für die Resilienz von technischer Infrastruktur unterstützen.

3.2.2.3 Erstellung von Auswertungsroutinen

Zur Berechnung und Visualisierung der Ergebnisse bzgl. der in Kapitel 3.2.2.2 beschriebenen Indikatoren wurden geeignete, nutzerverständliche Ausgabeformate identifiziert und die entsprechenden Berechnungen und Ausgaben zu einem großen Teil umgesetzt. Neben der Anzeige der Stoffströme in Sankey-Diagrammen direkt in SAmPSONS werden separate Ergebnistabellen erstellt. Diese enthalten die Ergebnisse zu den unterschiedlichen Indikatoren jeweils für die einzelnen Technologien und für das gesamte in SAmPSONS simulierte System in aggregierter Form. Entsprechend der von den Nutzer*innen getroffenen Auswahl der zu plottenden Kategorie (Kosten und Umweltwirkungen aus Bau/Erstellung; Betrieb; kombiniert) werden auch Grafiken erstellt und exportiert, wobei die Nutzer*innen die dazustellenden Indikatoren auswählen können. Des Weiteren werden Ergebnisdaten auf unterschiedliche Weise aggregiert und in Excel-Tabellenblättern zur bequemen weiteren Verarbeitung abgelegt. Somit haben die Nutzer*innen die Möglichkeit, sich ihren individuellen Anforderungen entsprechende Resultatgrafiken auch bequem selbst zu erstellen. Summatorische Ergebnisse unterschiedlicher Systemszenarien (aus unterschiedlichen Rechenläufen) lassen sich zudem bequem in einer vergleichenden Exceldatei zusammenfassen (vgl. hierzu auch das Kurzmanual des SAmPSONS-Programms).

Zur Sicherung der Internationalität von SAmPSONS wurden die Benutzerdialoge der Module sowie die Hilfedateien durchgängig zweisprachig (deutsch und englisch) angelegt. Bei Programmanwendung kann die gewünschte Sprache ausgewählt werden.

3.2.2.4 Auswahl und Zusammenstellung der Umweltprofile

In die Auswertung von Technologien und Stoffströmen, beispielsweise bzgl. Treibhausgasemissionen, gehen etliche Daten und Parameter ein. Die für SAmPSONS relevanten Daten wurden im Rahmen der Datensteckbrieferstellung ermittelt und mit Hintergrunddaten aus Ökobilanzdatenbanken (wie z. B. GaBi Version 8.1) kombiniert. Diese werden von SAmPSONS auf Basis einer Tabellenkalkulationsdatei eingelesen (vgl. Anhang B). Etwaige später notwendige Aktualisierungen (beispielsweise bei Änderungen des Umweltprofils der Zusammensetzung des deutschen Stromes – „Deutscher Strommix“) lassen sich durch Aktualisierung dieser Tabellenkalkulationsdatei einfach bewerkstelligen.

3.2.2.5 Umsetzung der Technologie-Steckbriefe in Simulationsmodule

Abbildung 1 zeigt die umgesetzten und im Simulator verfügbaren Verfahrensmodule. Diese wurden auf Basis der Steckbriefe unter Verwendung eines Modelleditors erstellt, der zum einen die Definition der erforderlichen Nutzer*innendialoge und zum anderen eine umfassende und komfortable Dokumentation der implementierten Ansätze erlaubt. In Anhang A ist die derzeit implementierte Modulbibliothek dargestellt. Exemplarisch zeigt Abbildung 7 einen ausgewählten Nutzer*innendialog des Moduls „Kläranlage (ohne Faulung) – Größenklasse 1 bis 5“. Abbildung 8 zeigt beispielhaft den Simulatorenaufbau in der Entwicklungsumgebung.



Blockparameter Kläranlage GK 5

Defaults for GK3

Parameter	Value	Unit
Einwohnergleichwerte dieser Kläranlage (pop)	poptotal	
Größenklasse (GK)	GK3	
Max. Kapazität einer Kläranlage dieser Größenklasse (EGW) (maxcap_0)	10000	PE
Anteilsfaktor für Umlage der Materials und der nichtverbrauchsbezogenen Kosten (pppp)	1.0	
Lebensdauer (liex_0)	20	years
Alter der Anlage (age)	0	years

Hilfe Defaults Abbruch OK

Abbildung 7: Auszug aus dem Parameterdialog für den Block „Kläranlage alle Größenklassen“

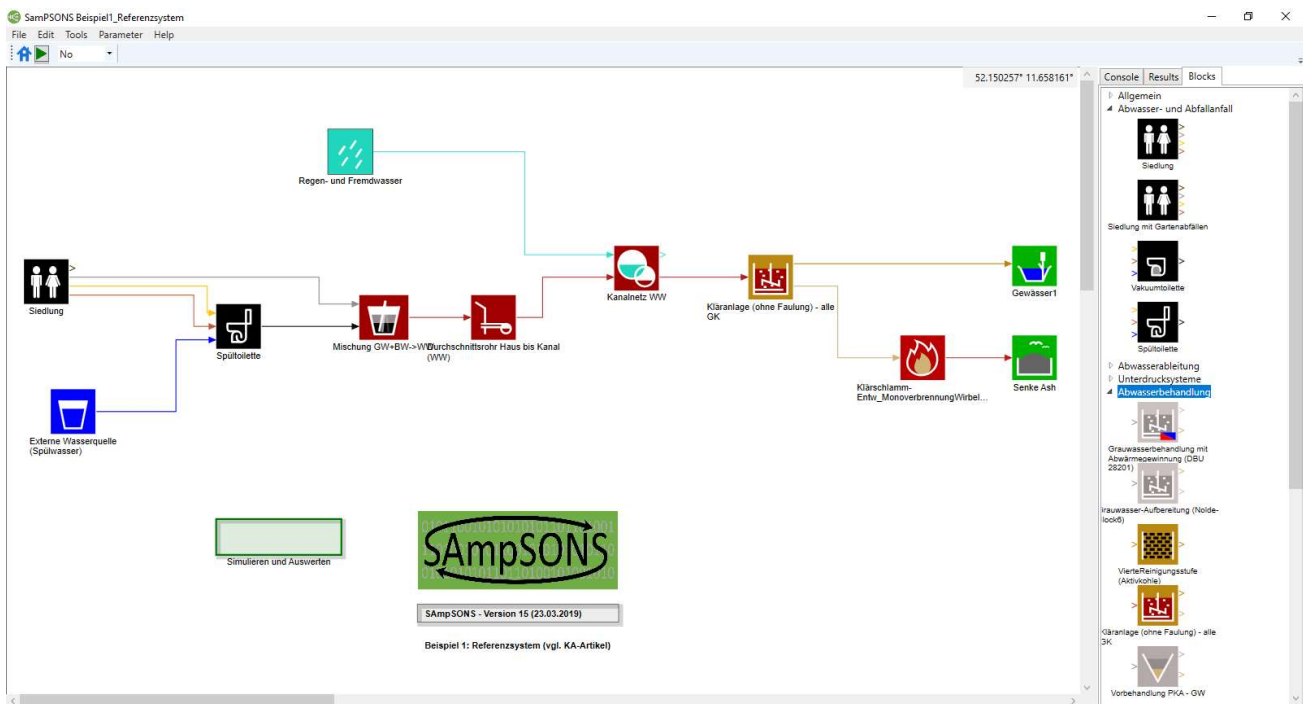


Abbildung 8: Nutzer*innenschnittstelle des SAmPSONS-Simulators

Nach Aufbau des jeweiligen Fallstudienmodells und Parametrisierung sowie der Verknüpfung der Verfahrensblöcke lassen sich per Knopfdruck Simulation und Auswertung in einem Schritt durchführen. Es werden umfangreiche tabellarische Ausgaben (Exceldatei mit Tabellenblättern für jeden Indikator), [summatorische tabellarische Ausgaben \(zum Szenarienvergleich\)](#) erzeugt sowie einige – für von Nutzer*innen ausgewählte Umweltindikatoren – Grafiken erstellt. [Zusätzliche Ausgabeb Tabellen, auch entsprechend der Glieder der „sanitation chain“](#) gruppiert, erleichtern zudem das Erstellen weiterer Grafiken durch die Nutzer*innen.

3.2.3 Erweiterungen des Simulatorkerns

Neben den bereits zuvor beschriebenen Erweiterungen und Ergänzungen des SAmPSONS-Simulators (Ergänzung der Module aus Phase 1 um weitere Spurenstoffe), Erstellung von Modulen entsprechend der neu hinzugekommenen Technologiesteckbriefe, Implementierung, Test und Verfeinerung des Berechnungsalgorithmus für den Indikator „Resilienz“, Erweiterung der Ergebnisausgaben und Einarbeitung von Nutzerfeedback aus dem Projektteam, aber auch von außerhalb) wurden noch Module zur Rückführung (beispielsweise von Zentrat) sowie zum Management der Spülwasserströme bei Nutzung von Grauwasser für die Toilettenspülung erarbeitet (Abbildung 9). Diese Module erlauben es nun, algebraische Schleifen aufzubrechen und entsprechende Technologiekonzepte in SAmPSONS zu simulieren und auszuwerten. Beispielsweise nutzen Fallbeispiele 1d, 5, 6, 7 diese Module in erheblichen Maße (vgl. Kapitel 3.4). Zudem werden in SAmPSONS2 konsequent Volumina [m³] und Massen [kg] auch für die verschiedenen Schlammströme betrachtet. Über ein globales Parametermenü lassen sich entsprechende spezifische Gewichte einstellen.

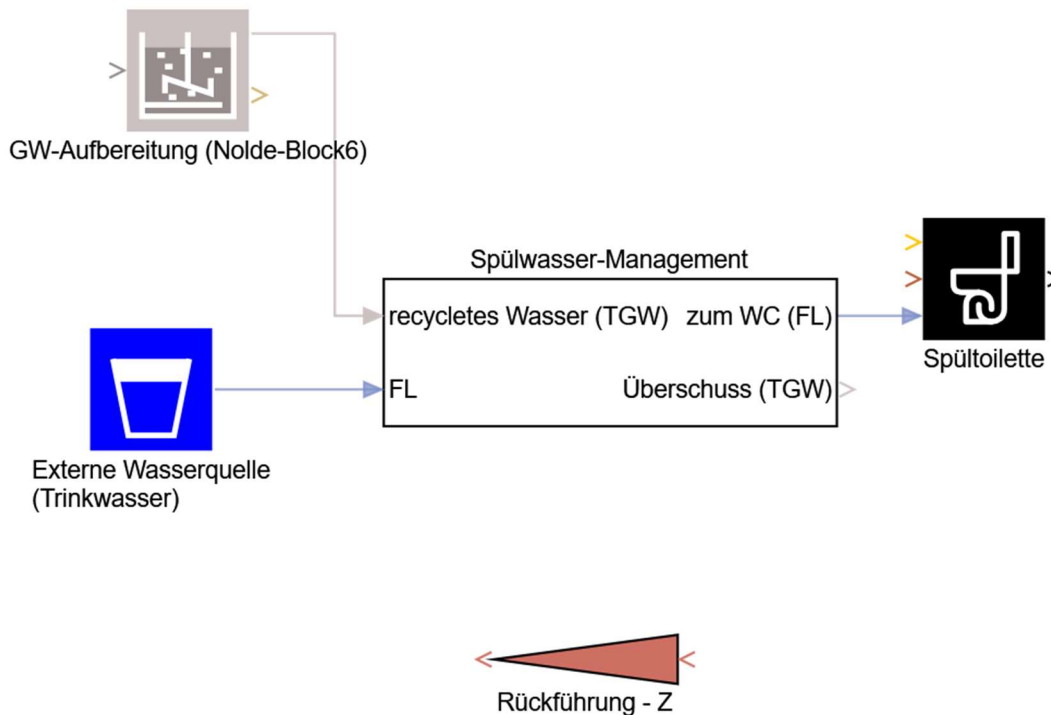


Abbildung 9: Module „Spülwasser-Management“ und „Zentrat-Rückführung“ für Rückführung und Management von Ressourcenströmen

3.2.4 Integration von Gutschriften für die Substitution von konventionellen Düngemitteln

Die Ersetzung von Mineraldünger durch rückgewonnene Nährstoffe aus Abwasser ist eine der Hauptanwendungen von Abwasserprodukten. Dafür ist die Berechnung der Substitutionsrate notwendig, die die Bewertung des nährstoffhaltigen Produktes in Bezug auf den Energiebedarf und die Emissionen ermöglicht.

Um den Effekt der Substitution dieser Produkte durch Mineraldünger zu bewerten, wird die Produktion von Mineraldünger und die damit verbundenen Emissionen und Energie betrachtet.

Es wird davon ausgegangen, dass der Mineraldünger durch rückgewonnene Nährstoffe ersetzt wird, und der damit verbundene Energiebedarf und die Emissionen bei der Herstellung von Mineraldünger als Gutschriften angerechnet werden. Die Gutschrift beschreibt den direkten Nutzen der zurückgewonnenen Energie und des Nährstoffs sowie den indirekten Nutzen durch die Einsparung von Energiebedarf aus Netzstrom, die Einsparung von Heizenergie und Verringerung der Ascheentsorgung (Zinati 2021).

Die Zahlenwerte zur Produktion von Mineraldünger in Deutschland und der damit verbundenen Energie- und Stoffströme stammen von Patyk und Reinhardt (1999), in der sie die Umweltauswirkungen von Mineraldünger erhoben haben. Wahrscheinlich spiegeln diese Daten aufgrund des technologischen Wandels der Bergbauprozesse in den letzten Jahrzehnten nicht mehr die genauen Umweltauswirkungen dieser Prozesse wider. Allerdings sind aktualisierte Datensätze nicht öffentlich zugänglich, so dass die Umweltauswirkungen der Substitution von Mineraldünger durch organischen Dünger möglicherweise leicht überschätzt werden.

Die Emissionen in die Gewässer werden in diesen Daten jedoch nicht erfasst, obwohl sie für die Umweltbewertung wichtig sein können. Daher wird für diese Emissionen eine andere Studie herangezogen (Gaillard et al., 1997). Die Daten wurden neu berechnet, indem sie über die Marktanteile und den Nährstoffgehalt auf den durchschnittlichen Einzeldünger bezogen werden. Tabelle 1 zeigt einen Überblick über wichtige Sachbilanzdaten bezüglich des Produktionsprozesses von Mineraldüngern für die Hauptmakronährstoffe N und P. Die Daten berücksichtigen die kompletten Prozesse der Produktion und Bereitstellung von Mineraldüngern, einschließlich Transport und Energieversorgung, beginnend mit der Gewinnung der Ressourcen bis zur Verpackung des marktfähigen Produkts. Der Transport der Düngemittel zu den Betrieben und die Emissionen bei der Ausbringung sind nicht enthalten, ebenso wenig wie der Bau und die Instandhaltung der Infrastruktur.

Detailliertere Informationen zu den Emissionen der verschiedenen Düngemitteltypen und der Pflanzenverfügbarkeit sind in Zinati (2021) zu finden.

Tabelle 1: Sachbilanz Mineraldüngerproduktion

Parameter	Einheit	kg N	kg P ₂ O ₅	kg P	Referenz
Primärenergiebedarf	MJ/kg	48,9	17,4	39,9	Patyk und Reinhard 1997; aktualisiert von Remy 2010
Emissionen in die Luft CO ₂ (fossil)	kg/kg	2,82	1,12	2,6	
Emissionen in die Luft CH ₄	kg/kg	7,50E-03	2,10E-03	4,81E-03	
Emissionen in die Luft NH ₃	kg/kg	6,70E-03	1,00E-05	2,29E-05	
Emissionen in die Luft N ₂ O	kg/kg	1,50E-02	4,00E-05	9,17E-05	
Emissionen in die Luft NO _x	kg/kg	1,60E-02	8,60E-03	1,97E-02	
Emissionen in die Luft SO ₂	kg/kg	5,20E-03	1,20E-02	2,75E-02	
Emissionen ins Wasser NH ₃ -N	kg/kg	2,70E-06	9,20E-06	2,11E-05	Gaillard et al. 1997; aktualisiert von Remy 2010
Emissionen ins Wasser NO ₃	kg/kg	1,90E-05	8,20E-06	1,88E-05	
Emissionen ins Wasser PO ₄	kg/kg	2,90E-05	4,40E-03	1,01E-02	

3.3 Öffentlichkeitsarbeit, Verstetigung und Qualitätssicherung

Neben den diversen Erweiterungen und Anpassungen von SAmpSONS war ein wesentliches Ziel von Projektphase 2 auch die verstärkte Dissemination in der Fachöffentlichkeit. Nur wenn potentielle Nutzer*innen von SAmpSONS wissen und das Tool kennen, können sie es auch für ihre Anforderungen nutzen. Und nur dann bekommen wir, das Entwickler*innenteam, auch Rückmeldung zu möglichen Fehlern oder Verbesserungsmöglichkeiten. Im Folgenden ist eine Liste aller Veröffentlichungen, Präsentationen, etc., die insgesamt seit Anfang der Entwicklung von SAmpSONS erstellt und durchgeführt wurden:

- 2. SAmpSONS Online Seminar am 21.04.2021
- 1. SAmpSONS Online Seminar am 17.11.2020. Verfügbar auf YouTube unter: <https://www.youtube.com/watch?v=6O2E7aiSMpw&t=52s>
- Präsentation von SAmpSONS bei der DWA Arbeitsgruppensitzung (DWA-Arbeitsgruppe KA-1.1, „Technik und Bemessung“) am 28.06.2019 in Koblenz bzw. am 18.09.2020 (online).

- Zinati, T., Wriege-Bechtold, A., Barjenbruch, M., Schütze, M., Schulz, M., Kraus, M., Wißmann, I., Vesper, S., Söbke, H., Londong, J. (eingereicht): SAmpSONS: Softwarewerkzeug zur vergleichenden Vorplanung von Abwasserinfrastrukturen. Eingereicht an Korrespondenz Abwasser Abfall im Dez. 2020.
- Schulz, M., Schütze, M., Zinati, T., Söbke, H., Wißmann, I., Kraus, M., Vesper, S., Wriege-Bechtold, A., Barjenbruch, M., Londong, J. (eingereicht): SAmpSONS: A software tool for comparative preliminary sustainability assessment of wastewater infrastructure systems. Abstract submitted to IWA Conference 2021 in Poznan, Poland 14.12.2020.
- Zinati, T., Barjenbruch, M., Schütze, M., & Wriege-Bechtold, A., (2020): Assessment of urban sanitation concepts for sustainable wastewater management, first International Conference on Urban Water Interfaces, 22.-24. Sep. 2020, abstract and online oral presentation
- Zinati, T., Barjenbruch, M. & Wriege-Bechtold, A., (2019a): Nutrient recovery efficiency of urban sanitation systems, the 7th International Water Association (IWA) specialist conference on natural organic matter (NOM7), 7.-10. Oct.2019, Tokyo, Japan, abstract and poster presentation
- Zinati, T., Barjenbruch, M. & Wriege-Bechtold, A., (2019b): Integrated nexus model for sustainable urban sanitation system. Proceedings of 11th World Congress of EWRA on Water Resources and Environment, 25.-29. 06. 2019, Madrid, Spain, oral presentation and reviewed paper: Garrote, L.; Tsakiris, G.; Tsihrintzis, V. A.; Vangelis, H.; Tigkas, D (Eds.) (2019): Managing Water Resources for a Sustainable Future. Proceedings of the 11th World Congress of EWRA on Water Resources and Environment. 11th WORLD CONGRESS on Water Resources and Environment. Madrid, Spain, 25-29 June, ISBN: 978-618-84419-0-3
- Schütze, M., Wriege-Bechtold, A., Zinati, T., Söbke, H., Wißmann, I., Schulz, M., Vesper, S., Londong, J., Barjenbruch, M., Alex, J. (2019): Simulation and Visualization of Material Flows in Sanitation Systems for Streamlined Sustainability Assessment. Water Science and Technology, 79(10), 1966–1976. doi.org/10.2166/wst.2019.199
- Zinati, T., Wriege-Bechtold, A., Zinati, B., Barjenbruch, M. & Lenzen, M., (2019): Assessment of source separated sanitation technologies for sustainable wastewater management, 12th IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse, 16.-20. June.2019, Berlin, Germany, abstract and oral presentation
- Schulz, M., Wißmann, I., Schütze M., Zinati, T., Wriege-Bechtold, A, Söbke, H., Vesper, S., Londong, J., Barjenbruch, M., Alex, J. (2019): SAmpSONS: Simulation und Visualisierung von Stoffströmen in Sanitärsystemen zur Nachhaltigkeitsbewertung. Veröffentlichung im Tagungsband der DWA-Landesverbandstagung am 19.06.2019 in Leipzig.
- Wissmann, I., Schulz, M., Vesper, S., Wriege-Bechthold, A., Zinati, T., Söbke, M., Schütze, M. (2019): Projekt SAmpSONS – Simulation und Visualisierung von Stoffströmen in neuartigen Sanitärsystemen – Unterstützung der Analyse ihrer Funktion, Kosten und Ressourcenhaushalts. 26. Simba-Anwendertreffen, Merseburg, 14./15.05.2019
- Zinati Shoa, T. and Barjenbruch, M.: Nutrient recovery by source separated sanitation technologies, IWA Nutrient Removal & Recovery Conference 2018, Brisbane, Australia, 18-21 November 2018.

- Schütze, M., Wriege-Bechtold, A., Söbke, H., Wißmann, I., Schulz, M., Vesper, S., Londong, J., Barjenbruch, M., Alex, J.: Simulation and Visualization of Material Flows in Sanitation Systems for Streamlined Sustainability Assessment; IWA Conference on Small Water & Wastewater Systems and Resources Oriented Sanitation; SWWS2018; Haifa, Israel, 14-18 October 2018
- Vorstellung einer Entwurfsversion von SAmpSONS auf der IFAT München, 14.-18.05.2018
- Zinati, T. & Barjenbruch, M., (2018): Evaluation of different treatment technologies of source-separated urine. Proceedings of 10th Eastern European Young Water Professionals Conference, 7.-12. May. 2018, Zagreb, Croatia, reviewed paper and oral presentation, ISBN: 978-953-8168-23-9
- Zinati, T. & Barjenbruch, M., (2017): Simulation of sanitation concepts for source separated wastewater. Proceedings of 8.th International Young Water Professionals Conference, 10.-13. Dec. 2017, Cape Town, South Africa, abstract and oral presentation
- Zinati, T., Barjenbruch, M. & Wriege-Bechtold, A., (2017): Source separation technologies, opportunities for sustainable wastewater management. European Water Resources Association, 58: 111-117, 2017., ISSN: 1105-7580
- Zinati, T., Barjenbruch, M. & Wriege-Bechtold, A., (2017a): Assessment of material and energy flow efficiency in different source separated sanitation technologies. Proceedings of the 9th Eastern European Young Water Professionals Conference, 24.-27. May. 2017, Budapest, Hungary, reviewed paper and oral presentation, ISBN: 978-963-313-256-2
- Zinati, T., Barjenbruch, M. & Wriege-Bechtold, A., (2017b): Source separation technologies, opportunities for sustainable wastewater management. Proceedings of 10th World Congress of EWRA on Water Resources and Environment, 05.-09. Jul. 2017, Athens, Greece, reviewed paper and oral presentation

Auf Basis dieser diversen Veröffentlichungsinitiativen bekamen wir von verschiedenen Seiten Rückmeldungen von Nutzer*innen, konnten Fragen beantworten bzw. auch Auffälligkeiten bei Simulationen beheben bzw. erläutern. Weitere von den Projektpartnern durchgeführte Outreach-Aktivitäten können hier nicht alle einzeln aufgeführt werden.

Besonders hervorzuheben aus oben aufgeführter Liste ist die Einreichung eines Fachbeitrages an die Redaktion der DWA-Zeitschrift „Korrespondenz Abwasser, Abfall“ im Dezember 2020 (bisher noch keine Rückmeldung). Diese Veröffentlichung geht mit einer Vorankündigung einher, in der wir Systemkomponentenanbieter*innen aufrufen, weitere Technologien in SAmpSONS zu integrieren. Dazu in der Folge noch weitere Informationen in Kapitel 3.3.2. Der Aufruf ist unter folgendem Link einzusehen: https://www.gfa-news.de/webcode.html?wc=20200929_006

Weiterhin hervorzuheben ist die rege Teilnahme an einem 1. Online Seminar zu SAmpSONS1 am 17.11.2020 und seinen wesentlichen Features. Insgesamt nahmen 63 Teilnehmer*innen aus der Ingenieurpraxis und aus der Forschung teil. Ein Mitschnitt des Seminars ist auf YouTube unter folgendem Link verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=6O2E7aiSMpw>. Ein 2. Online Seminar wird am 21. April 2021 durchgeführt.

Aufgrund der möglichen Anwendbarkeit von SAmpSONS wurden alle Projektpartner der BMBF Fördermaßnahme RePhor (Phosphor-Recycling für eine nachhaltige Nutzung von Phosphor) kontaktiert und zum 2. Online Seminar eingeladen.

Zuletzt ist zu erwähnen, dass es dem Projektpartner BCE gelang, einen ersten Auftrag zur vergleichenden Analyse von zwei Abwasserinfrastruktursystemen mithilfe von SAmpSONS zu gewinnen. Dabei geht es um eine Gegenüberstellung der Optionen Anschluss von ca. 300 EW an eine benachbarte Kläranlage und den Bau einer dezentralen Kläranlage für 300 EW.

Aufgrund der während der Projektphase 2 herrschenden Lage bzgl. der Corona-Pandemie war eine Teilnahme an Präsenzveranstaltungen – wie eigentlich geplant – leider nicht möglich. Dafür hielt Projektpartnerin Tayebah Zinati aber diverse Online Präsentationen zu SAmpSONS, siehe Liste oben.

Es ist sowohl das Ziel des Fördermittelgebers als auch aller Projektverantwortlichen, SAmpSONS auch nach Abschluss des Forschungsprojektes zu bewerben, dessen Nutzung zu steigern und SAmpSONS stetig zu erweitern. Dafür wurde in Projektphase 2 ein Verstetigungsprozess definiert, der 1. das Hosting und den kontinuierlichen Support der Software beinhaltet und 2. die Integration weiterer Technologien fördern kann.

3.3.1 Hosting und Support von SAmpSONS

Nach Abwägen verschiedenster Optionen zeigt sich ein Hosting durch die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) am aussichtsreichsten. Die DWA hostet bereits einige Softwarelösungen und kann auch eine damit verbundene IT-Infrastruktur (z.B. Hotline) anbieten. Noch dazu entstand die ursprüngliche Idee zur Entwicklung von SAmpSONS aus einer DWA-Arbeitsgruppe heraus, was das originäre Interesse der DWA-Mitglieder an SAmpSONS zeigt. Gespräche mit Vertreter*innen der DWA wurden bereits durchgeführt und klare Interessensbekundungen seitens der DWA zum Hosting von SAmpSONS wurden abgegeben. Weitere Details zu den einzelnen Modalitäten werden noch ausgearbeitet. Ab dem 21. April 2021 steht SAmpSONS2 zum Download auf der Internetseite des Projektpartners ifak zur Verfügung.

Die technische Verstetigung des SAmpSONS-Simulators ist durch seine Verwandtschaft mit dem Slmba#-Simulator gewährleistet – damit ist sichergestellt, dass sich SAmpSONS beispielsweise bei Windows-Updates und dergleichen an den jeweils aktuellen technischen Stand anpassen lässt.

3.3.2 Kontinuierliche Erweiterung von SAmpSONS

Die zweite Facette des Verstetigungsprozesses umfasst die Integration weiterer Technologien aus allen Abwasserinfrastrukturbereichen, d.h. von der Erfassung, über den Transport bis zur Behandlung, wobei die Behandlung auch Abwasserteilströme, Reststoffentsorgung und Energie-

und Nährstoffrückgewinnung einschließen soll. Das Ziel ist es, Systemkomponentenanbieter*innen in diesen Teilbereichen die Möglichkeit zu bieten, Daten zu ihren spezifischen Verfahren bereitzustellen und somit allen SAmPSONS-Nutzer*innen zur Verfügung zu stellen. Dazu ist es erforderlich, dass die Anbieter*innen von Systemkomponenten zunächst einen Daten-Steckbrief ausfüllen. Das SAmPSONS-Team unterstützt die Anbieter*innen der Systemkomponenten bei dieser Aktivität. Nachdem ein vollständiger Daten-Steckbrief erstellt wurde, soll dieser einen Qualitätssicherungsprozess durch unabhängige Dritte durchlaufen. Für diesen Zweck wurde bei Experten*innen aus der DWA-Arbeitsgruppe KA-1.1, „Technik und Bemessung“ angefragt, die Rolle als „SAmPSONS-Beirat“ zu übernehmen. Einige Vertreter*innen erklärten sich bereit, und so konnte dieser Qualitätssicherungsprozess in Projektphase 2 an insgesamt 3 Daten-Steckbriefen getestet werden. Im Ergebnis waren die Rückmeldungen aus dem Qualitätssicherungsprozess sehr hilfreich, und so konnte die Qualität der Informationen und Daten in den Daten-Steckbriefen bzw. Verfahrensblöcken zusätzlich erhöht werden. Nach Abschluss der Qualitätssicherung werden der Daten-Steckbrief in SAmPSONS als ein neuer Modellierungsblock unter Einbeziehung der Anbieter*innen der Systemkomponente und des SAmPSONS-Teams integriert. Der vorgeschlagene Verstetigungsprozess ist in Abbildung 10 illustriert.

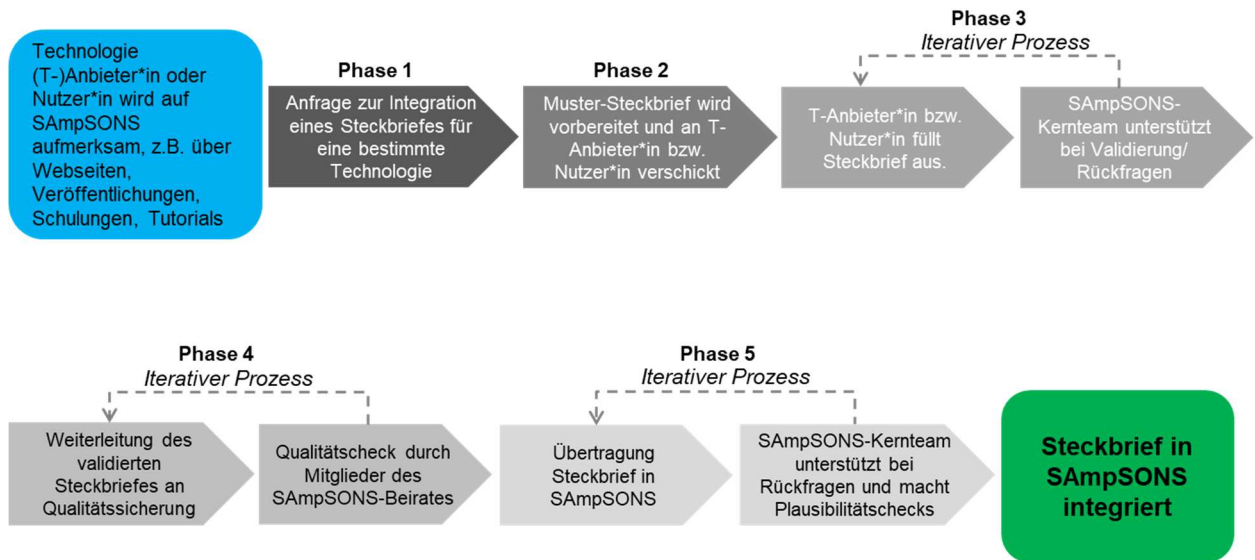


Abbildung 10: Verstetigungsprozess in SAmPSONS

Durch den beschriebenen Verstetigungsprozess wäre eine fortlaufende Aktualisierung von SAmPSONS gegeben, so dass die Nutzer*innen state-of-the-art Technologien in ihren Vorplanungen von Abwasserinfrastruktursystemen berücksichtigen können. Für Anbieter*innen, die ihre Systemkomponenten in SAmPSONS integrieren, ergeben sich Vorteile: Zum einen stellt SAmPSONS eine übersichtliche Nachhaltigkeitsbewertung der jeweiligen Systemkomponenten bereit, die mit Ergebnissen von ähnlichen Systemkomponenten verglichen werden können und gleichzeitig zur Optimierung der Systemkomponenten genutzt werden können. Zum anderen können Systemkomponentenanbieter*innen über die Integration in SAmPSONS auf ihre Systemkomponenten aufmerksam machen, die dann in der Vorplanung von Abwasserinfrastruktursystemen Berücksichtigung finden können.

Beispielsweise befinden sich durch eine Zusammenarbeit des ifak mit der TU Hamburg-Harburg bereits auch Module für das Terra-Preta-Konzept in Erarbeitung.

Die genaue Vorgehensweise und Finanzierung dieses Erweiterungsprozesses wird ebenfalls noch weiter ausgearbeitet.

3.4 Wesentliche Ergebnisse - Fallbeispiele

Die Validierung und Illustrierung des Anwendungsspektrums von SAmpSONS erfolgte anhand verschiedener Fallbeispiele. Die Validierung gibt zum einen Rückmeldungen für die Entwicklung sowohl auf fachlicher (Richtigkeit der getroffenen Annahmen) als auch technischer Ebene (Korrektheit der technischen Umsetzung). Zum anderen hilft sie, die Qualität der erreichten Simulationsergebnisse zu beurteilen (Evaluierung der Simulationsergebnisse). Methodisch wurden verschiedene Fallbeispiele identifiziert, die erstens inhaltlich mit ROSS verknüpft sind (z.B. durch existierende Umsetzungen oder Planungen) und für die zweitens eine gute Datengrundlage existiert. Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse von SAmpSONS mit den vorliegenden Daten und den ermittelten Ergebnissen ergeben sich Hinweise auf die Qualität der Simulationsergebnisse und notwendige Änderungsbedarfe. [Des Weiteren illustrieren die Fallbeispiele den SAmpSONS-Anwender*innen die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten des SAmpSONS-Simulators, insbesondere die der in Phase 2 hinzugekommenen Elemente.](#)

In der Entwicklung von SAmpSONS in Projektphase 1 erfolgte eine Fokussierung auf bestimmte, als wesentlich angesehene Technologien. Das führte dazu, dass nicht alle Technologien, die in den Fallbeispielen dargestellt sind, in SAmpSONS1 zur Verfügung standen. Hinzu kommt die unterschiedliche Ausgestaltung innerhalb der Technologien. Beispielsweise kommen in Kläranlagen sehr unterschiedliche Verfahren zur Behandlung des Abwassers zum Einsatz. In SAmpSONS kann dieser Vielfalt an Möglichkeiten sowohl an unterschiedlichen Technologien als auch an Kombinationsmöglichkeiten innerhalb einer Technologie nur bedingt Rechnung getragen werden. Während der Abbildung der Fallbeispiele zeigte sich allerdings auch, dass SAmpSONS die Möglichkeit bietet, die einzelnen Technologien auf spezifische Bedarfe anzupassen.

Die Darstellung der Fallbeispiele 0 bis 3 (mit Ausnahme von Fallbeispiel 1d) beruht auf ihrer Implementierung in Phase 1.

[In Projektphase 2 wurden drei weitere Fallbeispiele \(einschließlich ihrer Varianten\) aufgebaut und ausgewertet \(siehe Kap. 3.4.7, 3.4.6, 3.4.8\). Bei der Auswahl der Fallbeispiele wurde darauf geachtet, dass insbesondere die Ergänzungen und Neuerungen aus Projektphase 2 über Fallbeispiele validiert werden. Somit war ein Fallbeispiel darauf ausgerichtet, über die Verkettung der neu entwickelten disaggregierten einzelnen Verfahren der Klärschlammbehandlung in etwa die gleichen Ergebnisse in SAmpSONS zu erzielen wie die in Projektphase 1 definierten aggregierten Verfahrensblöcke, siehe Kap. 3.4.7.](#)

[Da in Projektphase 2 auch zwei weitere Verfahren von 4. Reinigungsstufen, i.e. Ozonierung und UV-Behandlung in SAmpSONS integriert wurden, fokussiert dieses Fallbeispiel auf die Unterschiede der Verfahren bzgl. der Spurenstoffelimination bei gleichzeitiger Betrachtung von Kosten und potentiellen Umweltwirkungen, siehe Kap. 3.4.6.](#)

Im dritten Fallbeispiel aus Projektphase 2 werden unterschiedliche P-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm in SAmpSONS simuliert und die Ergebnisse verglichen. Dabei liegt der Fokus auf dem Vergleich der Ergebnisse aus SAmpSONS mit den Ergebnissen einer detaillierten Analyse der Umweltwirkungen und Kosten, siehe Kap. 3.4.8.

3.4.1 Fallbeispiel 1- Wohlsborn (BUW)

Wohlsborn ist eine 500 Einwohner-Gemeinde nördlich von Weimar in Thüringen. Neben einer Neubausiedlung gibt es einen Altort, dessen Abwasserinfrastruktur nicht mehr dem Stand der Technik entspricht und sanierungsbedürftig ist. Die Einwohnerzahl von Altort und Neubausiedlung ist in etwa gleichverteilt, so dass für beide 250 Einwohner anzunehmen sind. Im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts TWIST++ (FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI 2016) war Wohlsborn Modellgebiet. Es existieren daher verschiedene Planungsalternativen sowohl für die Anwendung von ROSS als auch für die Ertüchtigung der Wasserinfrastruktur mit konventionellen Systemalternativen, die jeweils auf Nachhaltigkeit bewertet wurden (SARTORIUS ET AL. 2017). Die Planungsalternativen wurden als Quelle verschiedener Simulationsszenarien genutzt. Dabei ist anzumerken, dass die Abwasserinfrastruktur für die Neubausiedlung im aktuellen Zustand belassen werden kann und nur für den Altort Planungsalternativen untersucht werden müssen. Ebenfalls ist die Teilortskanalisation (Teilortskanäle: Entwässerungssysteme variabler baulicher Qualitäten, die dezentral vorbehandeltes häusliches Schmutzwasser und meist auch Niederschlagswasser ohne weitere Behandlung in ein Gewässer einleiten), in allen betrachteten Simulationsszenarien enthalten. Die Vergleichswerte zur Evaluation der Simulationsergebnisse wurden über eine personell von der Entwicklungsarbeit unabhängige Datenerhebung und Modellierung bereitgestellt (STEINHAUER 2018).

Insgesamt wurden drei verschiedene Simulationsszenarien betrachtet, die im Folgenden jeweils kurz beschrieben sowie graphisch dargestellt werden.

3.4.1.1 Szenario 1: Ist-Zustand

Das Szenario Ist-Zustand (Abbildung 11) illustriert das derzeitige zweigeteilte Sanitärsystem im Ort. Im Altort gibt es mechanische Absetzgruben, die in die sogenannte Teilortskanalisation entwässern. Diese entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik und müssten bei Beibehaltung des Systems durch aktuelle Kleinkläranlagen ersetzt werden.

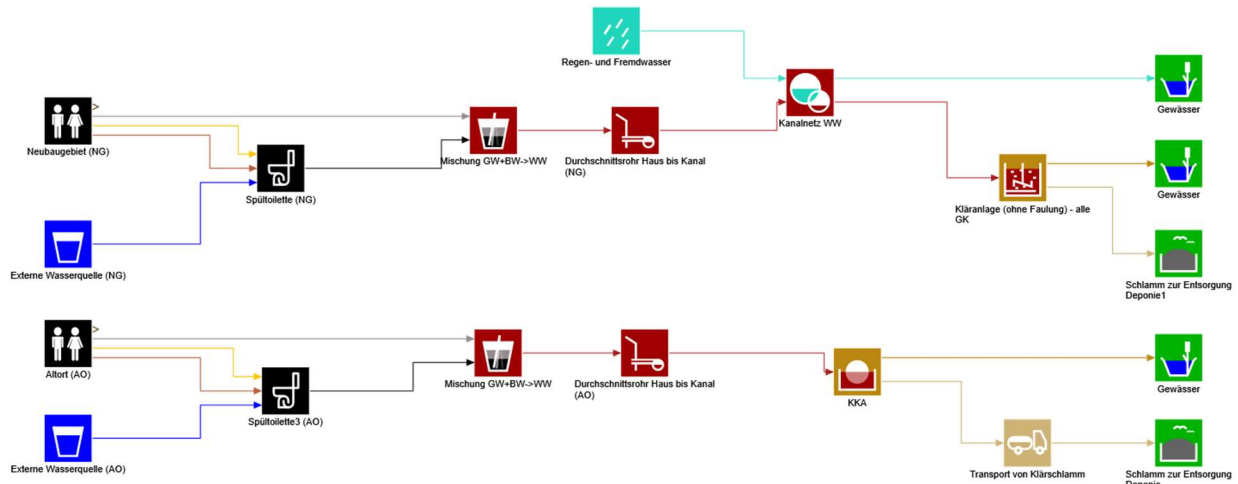


Abbildung 11: Wohlsborn-Szenario 1: Ist-Zustand

3.4.1.2 Szenario 2: Konventionelles Abwassersystem

Das Szenario „Konventionelles Abwassersystem“ (Abbildung 12) zeigt das Ergebnis der Sanierung des nicht mehr dem Stand der Technik entsprechenden Sanitärsystems nach konventionellen Lösungsansätzen. Im Einzelnen sind dies die Maßnahmen:

- Neubau von Schmutzwasserkanälen
- Überleitung des Schmutzwassers in die 3 km entfernte Kläranlage Leutenthal.

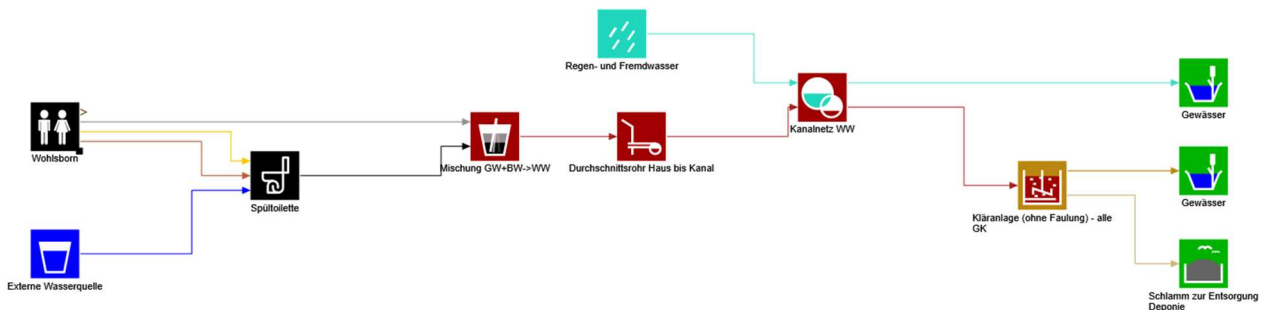


Abbildung 12: Wohlsborn-Szenario 2: Konventionelles Abwassersystem

3.4.1.3 Szenario 3: ROSS

Dieses Szenario illustriert die Nutzung von ROSS-Komponenten bei der Sanierung des Sanitärsystems des Altorts (Abbildung 13). Methodisch wird dabei auf die Variante ROSS I der in TWIST++ betrachteten Planungsalternativen zurückgegriffen (SARTORIUS ET AL. 2017). Das Szenario zeichnet sich aus durch die folgenden Maßnahmen:

- Trennung der Ströme Schwarz- und Grauwasser durch Doppel-Inliner-Technik in Bestandsgebäuden
- Unterdruckableitung des Schwarzwassers

- Anaerobe Behandlung des Schwarzwassers in einer ortsspezifischen UASB-Anlage (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor)
- On-Site-Behandlung von Grauwasser (Submerged Biomembrane Reactor (SMBR))
- Nutzung der vorhandenen Teilortskanäle für die Regenwasserableitung

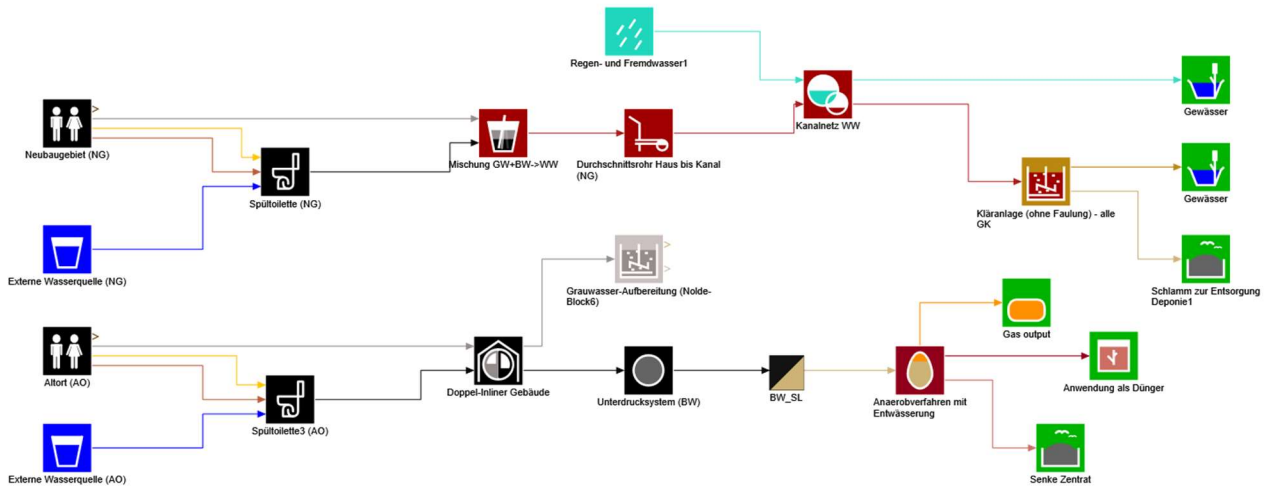


Abbildung 13: Wohlsborn-Szenario 3: ROSS

Abbildung 14 zeigt die Volumene der Stoffströme des Szenarios 3.

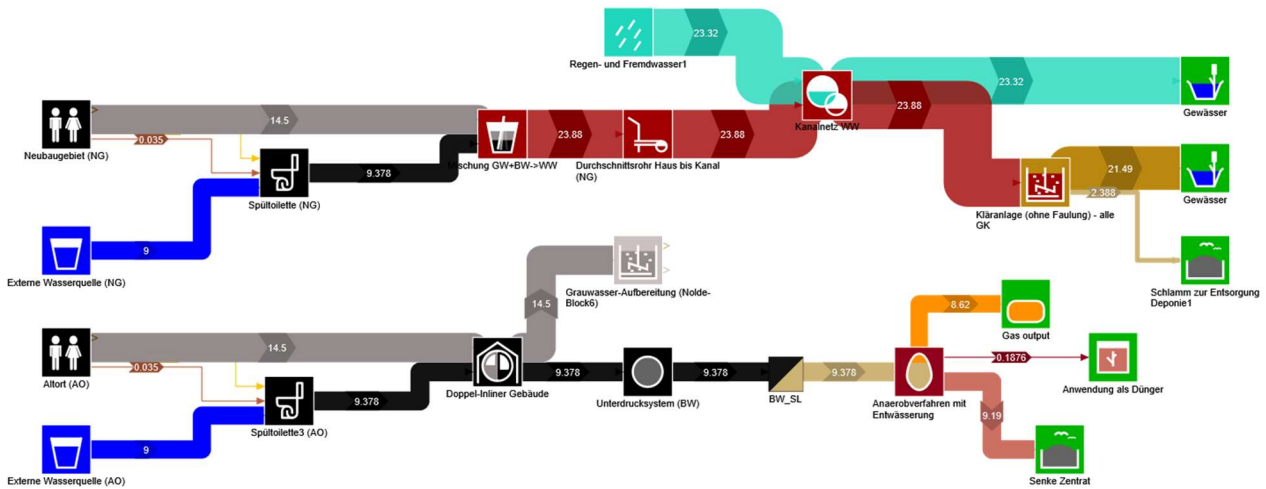


Abbildung 14: Wohlsborn-Szenario 3 (ROSS): Sankey-Diagramm der Stoffströme (Einheit: m³/d)

3.4.1.4 Szenario 4: Grauwasser-Wiederverwendung

Dieses Szenario 4 dient lediglich zur Illustration der Verwendung der Simulationsmodule zur Grauwasserwiedernutzung. Abbildung 15 zeigt die entsprechenden Stoffströme, es wird deutlich sichtbar, dass in diesem hypothetischen Beispiel durch die Grauwassernutzung erhebliche Einsparungen an Trinkwasser erzielt werden können.

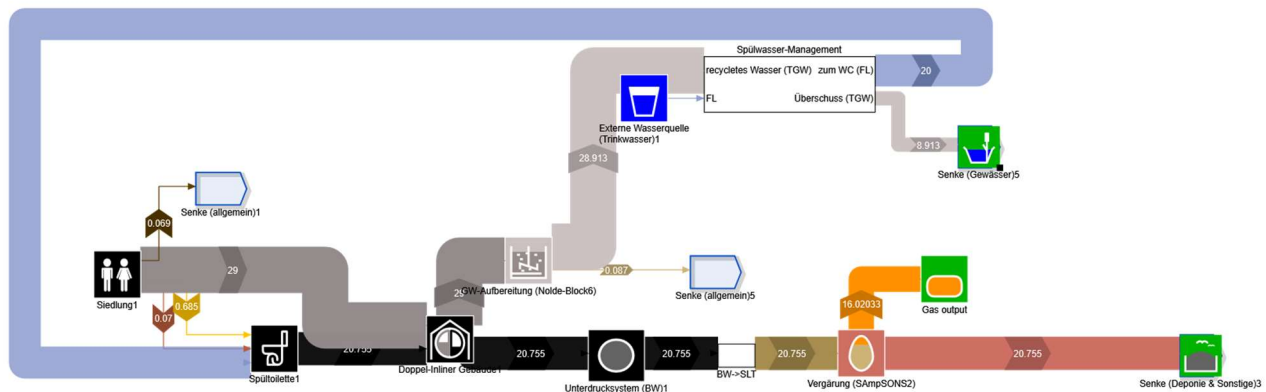


Abbildung 15: Wohlsborn-Szenario 4 (Grauwasser-Wiederverwendung): Sankey-Diagramm der Stoffströme (Einheit: m³/d)

3.4.1.5 Vorgehen

Die Szenarien 1 bis 3 wurden genutzt, um die Simulationsergebnisse von SAmPSONS mit den Referenzwerten aus SARTORIUS ET AL. (2017) und STEINHAEUER (2018) zu vergleichen. Insbesondere dienen diese Szenarien der vergleichenden ökonomischen Betrachtung. Beim Vergleich der beiden Szenarien 1 und 3 ergab sich beispielsweise ein Kostenvorteil von 33 % zugunsten des ROSS-Szenarios. Die Werte müssen jedoch vor dem Hintergrund einer hohen Datenunsicherheit betrachtet werden, die als typisch für die Grobplanung anzusehen ist. Auch weisen verschiedene Publikationen auf diese Herausforderung hin (z.B. SCHULZ ET AL. (2012)). Zu den Unsicherheiten, mit denen die Berechnungsergebnisse behaftet sein können, zählen:

- **Nutzung von Standardwerten.** Obgleich einige Szenario-spezifische Werte ermittelt wurden, flossen in die Ergebnisse eine Vielzahl der in SAmPSONS hinterlegten Standardwerte ein. Diese drücken zum einen die hohe Flexibilität von SAmPSONS aus, können aber im konkreten Einzelfall durch eine großzügige allgemeingültige Abschätzung zu einer hohen Abweichung führen, die oft nicht durch fallspezifische Einzelwerte verhindert werden kann. Beispiel hierfür sind die Baukosten von Kanalleitungen, die einer Vielzahl von Einflussfaktoren unterliegen, wie der notwendigen Bautiefe, der Untergrundbeschaffenheit oder der Siedlungsdichte.
- **Unterschiede in den Komponenten.** Es werden Komponenten unterschiedlicher Ausgestaltung verbaut, deren Charakteristiken sich nicht alle detailgetreu erfassen lassen. Auch konnten zum Teil nur Werte von Komponenten ermittelt werden, die nicht als repräsentativ für alle Anwendungsfälle gelten können.
- **Händelbarkeit der Modelle.** Die Erfassung sämtlicher Einflussfaktoren würde den Umfang von SAmPSONS sprengen und überfordert zudem die Nutzer*innen. Aus diesem Grund wurden beispielsweise keine regionalen Unterschiede von Kostenniveaus abgebildet.
- **Keine automatische Anpassung der Kosten.** Auf eine automatische Anpassung der Kosten aus verschiedenen Jahren wird gleichfalls verzichtet.
- **Bezugsgröße EW.** Die Bezugsgröße EW-Gleichwerte verursacht Verzerrungen, wenn z.B. Stoffströme geteilt werden. Zudem wurde für viele Komponenten eine lineare Skalierbarkeit angenommen, die aber in der Realität so nicht vorliegt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass SAmPSONS konzeptionell in der Lage ist, Anhaltswerte für die Kosten (u.a. Betriebskosten, Fixkosten oder Investitionskosten) verschiedener

Szenarien zu berechnen. Die Genauigkeit der derzeit berechneten Werte erlaubt eine grobe Orientierung, muss aber im Einzelfall geprüft werden.

3.4.2 Fallbeispiel 2: Ergebnisse aus dem SCST-Projekt Stahnsdorf und Dissertation Remy (2010) (TUB)

Auf dem Klärwerk der Berliner Wasserbetriebe in Stahnsdorf war in einem Wohn- und einem Betriebsgebäude ein ressourcenorientiertes Sanitärsystem installiert. In den Jahren von 2003 bis 2006 wurden hier im Rahmen des EU-Demonstrationsprojektes „Sanitärkonzepte für die separate Erfassung und Behandlung von Urin, Fäkalien und Grauwasser – SCST“ Untersuchungen durchgeführt. Ziel des SCST-Projektes war die Erprobung ressourcenorientierter Sanitärkonzepte (Fließbild siehe Abbildung 16). Insbesondere sollte der Fokus auf die ökologischen und ökonomischen Vorteile/Nachteile beim Einsatz von ROSS gegenüber den konventionellen Sanitärsystemen mit Schwemmkanalisation und zentraler Kläranlage (end-of-pipe-System) aufgezeigt werden.

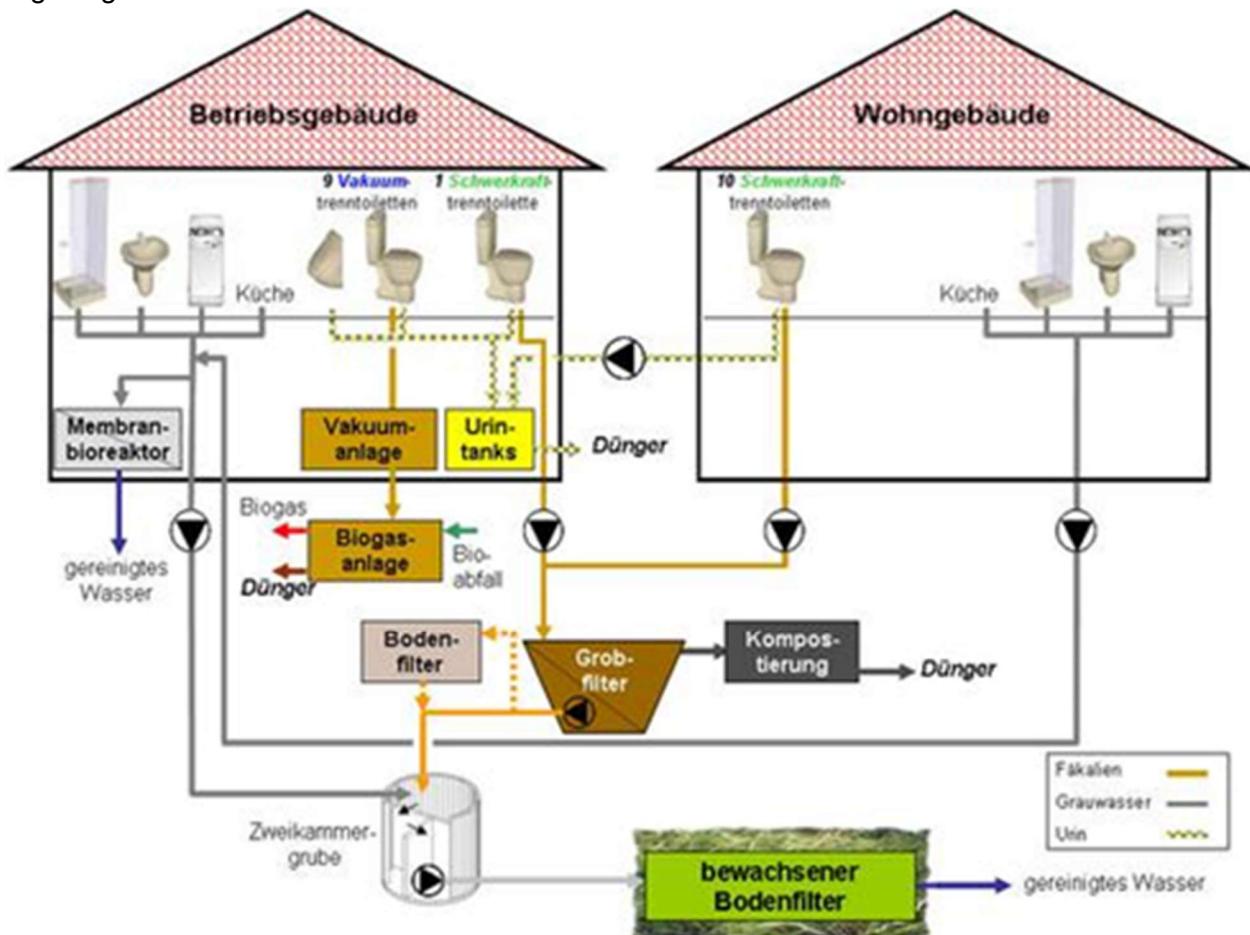


Abbildung 16: Darstellung des stoffstromorientierten Sanitärkonzeptes in KWB (2012)

Im Rahmen des SCST-Projektes wurde, um potenzielle Vor- und Nachteile gegenüber den konventionellen Sanitärsystemen abschätzen zu können, eine Kostenvergleichsrechnung sowie die Methodik des Life Cycle Assessments (LCA) für verschiedene Szenarien (siehe Abbildung 18) alternativer und konventioneller Sanitärsysteme anhand eines Baugebietes einer fiktiven mittelgroßen Siedlung im Berliner Raum (siehe Abbildung 17) mit 5.000 Einwohnern genutzt.

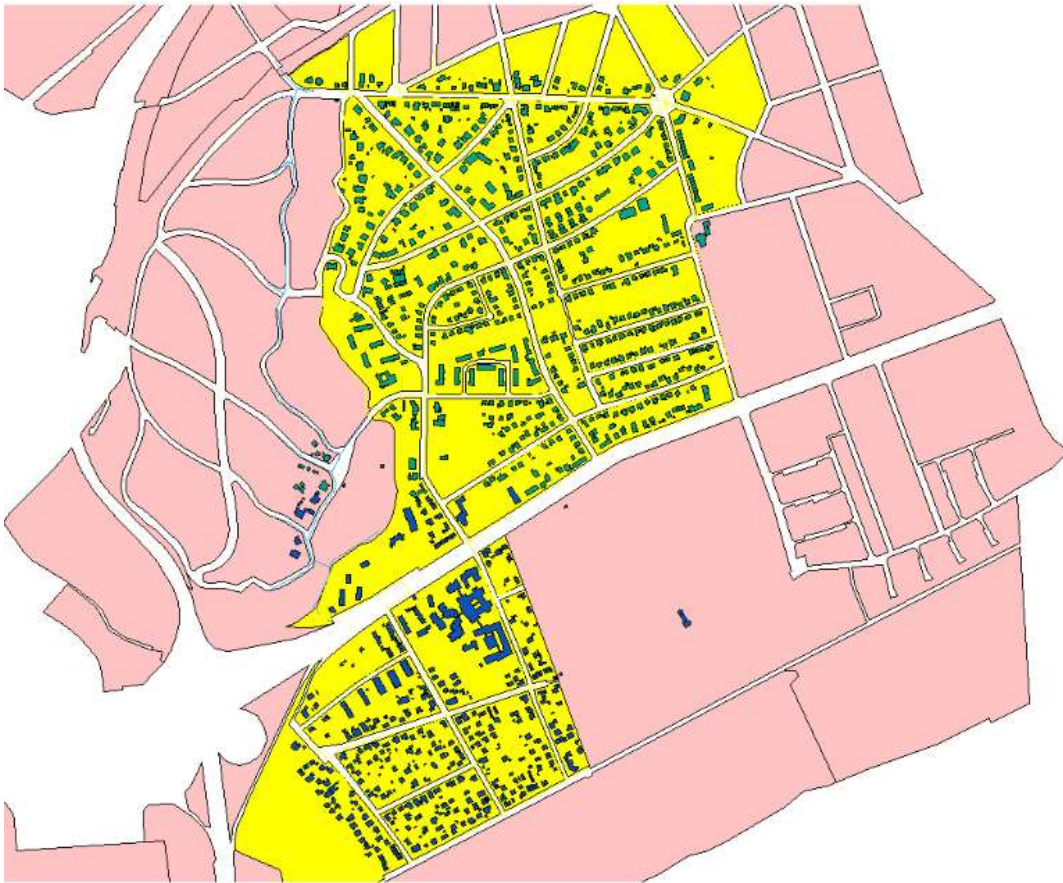


Abbildung 17: Untersuchungsgebiet (Berlin Nicolassee) für verschiedene Szenarien im SCST-Projekt (Otterwasser 2007)

Dabei wurden neben dem ökologischen Vergleich auch ökonomische Parameter (Bau der Infrastruktur) herangezogen, um deren Einfluss auf die Gesamtökobilanz darzustellen. Ein Bestandteil war der ökologische Vergleich von alternativen Verfahren der Teilstrombehandlung von Gelb-, Braun-, Schwarz- und Grauwasser sowie dazugehörend Bioabfällen über den Zeitraum von einem Jahr.

Die Ergebnisse wurden zum einen aus REMY & RUHLAND (2006) sowie aus REMY (2010) betrachtet. Insgesamt wurden untersucht:

Scenario	Urine	Faeces	Greywater	Biowaste*
R	Combined collection and treatment in CAS plant (extended nutrient removal, sludge digestion and incineration)			
R_{min}	Combined collection and treatment in CAS plant (only nitrification, aerobic sludge stabilisation and incineration)			Composting → fertilizer
R_{agri}	Combined collection and treatment in CAS plant (extended nutrient removal, sludge digestion and application in agriculture)			
V1			SBR	
V2	Vacuum drainage and digestion → energy + fertilizer		Soil filter	Digestion → energy and fertilizer
V3			MBR + reuse	
SV1			SBR	
SV2	Separate collection → fertilizer	Vacuum drainage and digestion → energy + fertilizer	Soil filter	Digestion → energy and fertilizer
SV3			MBR + reuse	
SC1			SBR	
SC2	Separate collection → fertilizer	Gravity drainage and composting → fertilizer	Soil filter	Composting → fertilizer
SC3			MBR + reuse	

* 50% of garden biowaste and 20% of kitchen biowaste is incinerated in each scenario
 CAS: conventional activated sludge
 SBR: sequencing batch reactor
 MBR: membrane bioreactor

Abbildung 18: Untersuchte Verfahrenskombinationen nach REMY (2010)

Die im SCST-Projekt ermittelten Ergebnisse wurden mit Ergebnissen einer Simulation mithilfe von SAmPSONS verglichen. Als Variante für den Vergleich wurde das Szenario V2 von REMY (2010) ausgewählt, da dieses Szenario komplett mit allen in SAmPSONS verfügbaren Blöcken abgebildet und modelliert werden konnte (Abbildung 19).

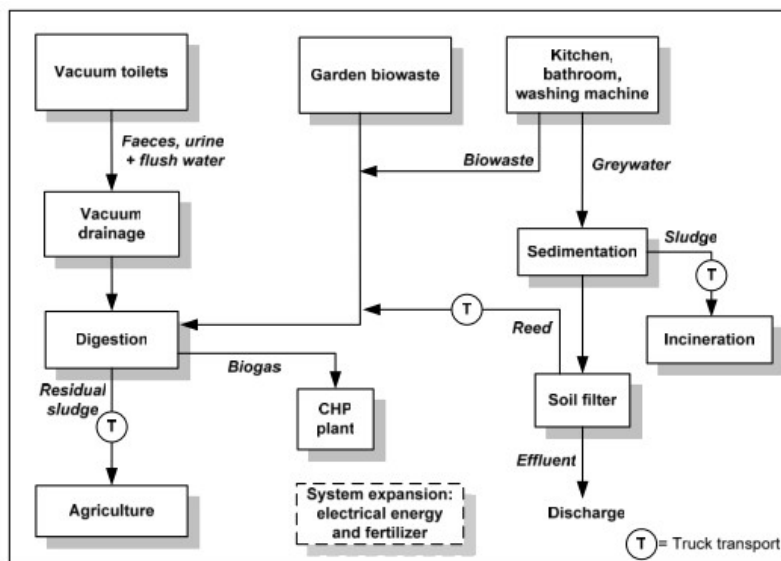


Abbildung 19: Szenario V2 aus der Dissertation von REMY (2010)

3.4.2.1 Darstellung des in SAmPSONS simulierten Systems

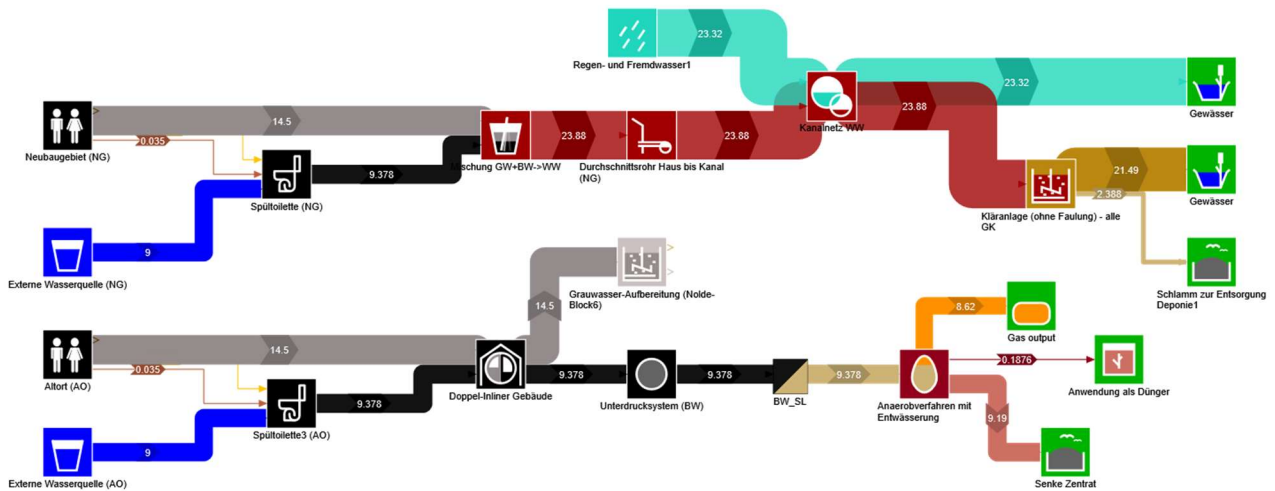


Abbildung 20: in SAmPSONS erstelltes Simulationsbeispiels anhand der Verfahrenskombination Szenario V2 im SCST-Projekt (REMY (2010))

Die Siedlungsgröße ist auf 5.000 Einwohner festgelegt worden. Dabei handelt es sich um ein reines Wohngebiet. Öffentliche Gebäude, wie Krankenhäuser, Schulen oder Kindergärten, sind nicht Bestandteil der Betrachtungen. Der Bilanzraum ist auf das Gebiet beschränkt. Transfers jeglicher Art aus oder zu Außenbereichen werden nicht berücksichtigt.

3.4.2.2 Erfassung

Die Aufteilung des Abwassers erfolgt in die Teilströme Grauwasser und Schwarzwasser. Weiterhin wird der Stoffstrom Bioabfall betrachtet. Die Erfassungsgegenstände außer den Toiletten (Duschen, Handwaschbecken etc.) werden nicht detailliert dargestellt.

3.4.2.3 Transport und Behandlung

Das Grauwasser wird in einer Dreikammergrube mechanisch vorbehandelt. Dabei erfolgt eine Abscheidung der Feststoffe. Danach wird das vorbehandelte Grauwasser (PTGW-pre-treated Greywater) in einem bewachsenen Bodenfilter (Pflanzenkläranlage-PKA) behandelt. Das gereinigte Grauwasser wird in ein Gewässer eingeleitet. Eine weitere Behandlung nach der PKA (Hygienisierung etc.) erfolgt nicht. Der Primärschlamm aus der mechanischen Vorbehandlung wird einer Monoverbrennung (Wirbelschichtverfahren) zugeführt. Die dabei entstehende Asche wird bilanziell in einer Senke (Ash) gesammelt.

Das Schwarzwasser wird aus den drei Teilströmen Urin, Fäzes und Spülwasser zusammengesetzt und in Vakuumtoiletten erfasst, abgeleitet und mit dem in den Haushalten gesammelten und vorbehandelten (zerkleinerten) Bioabfällen gemischt. Beide Teilströme werden in der Co-Vergärung

(Co-Substrat: Bioabfälle) in Biogas und Schlamm transformiert. Der in der Vergärung entstehende Schlamm wird in der Landwirtschaft als Dünger eingesetzt. Das produzierte Biogas wird in einem Blockheizkraftwerk in elektrische und thermische Energie umgewandelt und bilanziert. Mengenmäßig sind die Stoffströme in Abbildung 20 dargestellt. Tabelle 2 enthält die Komponenten des Referenzsystems und Aussagen zur Abbildbarkeit in SAmpSONS.

Tabelle 2: Darstellung des Fallbeispiels in SAmpSONS und Vergleich mit denen in SCST Bericht untersuchten Technologien

Referenzsystem	
Komponenten	abbildbar in SAmpSONS
Mengen und Frachten	ja
Vakuumtoilette	ja
Vakuumrohrleitung	ja
Vergärung	ja
Anwendung in der Landwirtschaft	ja ^{*1}
Mitbehandlung von Küchenbioabfall	ja ^{*2}
Mitbehandlung von Garten-Bioabfall	ja ^{*2}
Biogasnutzung BHKW	ja
Monoverbrennung	ja ^{*3}
Mitbehandlung des Bewuchses des Bewachsenen	nein ^{*4}
Verbrennung Bewuchs	nein ^{*4}

*1 als Senke zur Bestimmung des Recyclingpotenzials ohne Emissionen etc.

*2 ohne Erfassungssystem

*3 der Block Monoverbrennung enthält die Verfahren: Entwässerung, Faulung, Trocknung und Monoverbrennung in aggregierter Form

*4 eine Bilanzierung des Bewuchses erfolgte nicht

3.4.2.4 Vergleich der verschiedenen Parameter

Für die Validierung wurden verschiedene Parameter ausgewertet, die mit SAmpSONS bilanziert werden können. Anhand der vorliegenden Daten aus REMY (2010) wurden die Simulationsergebnisse ausgewertet und verglichen. Es wurden insbesondere die folgenden Parameter betrachtet:

- Nährstoffe (Stickstoff, Phosphor, Kalium)
- Kohlenstoff - CSB

- Energiebedarf
- Umweltwirkungen
 - Eutrophierungspotenzial
 - Treibhausgaspotenzial
 - Primärenergiebedarf

3.4.2.5 Nährstoffe

Stickstoff

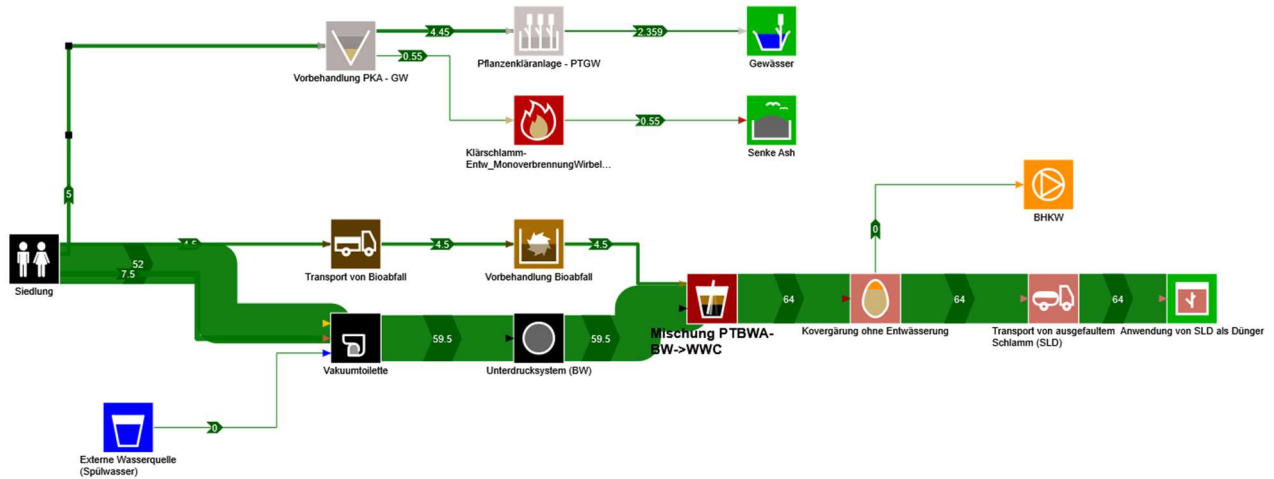


Abbildung 21: Sankey-Diagramm zum Stickstoff-Recycling-Potenzial [kg N/d]

Stickstoff ist zum größten Anteil im Teilstrom Urin und damit, nach Mischen mit Fäzes und Spülwasser, im Schwarzwasser enthalten. Eine weitere Stickstofffracht kommt aus den Bioabfällen hinzu. Der N-Anteil im Bioabfall beträgt in diesem Beispiel 7 %.

Eine Wiedernutzung kann nach Co-Vergärung in der Landwirtschaft erfolgen. Eine Entwässerung des Klärschlammes wurde in der SAMPSONS-Simulation nicht berücksichtigt. Hinsichtlich der Transportauswirkungen könnte an dieser Stelle mithilfe einer Entwässerung des Schlammes optimiert werden. Etwaige Verluste bei der Behandlung können für die Simulation in SAMPSONS erfasst werden. Bei diesem Szenario wurden keine Stickstoffverluste berücksichtigt. Der Stickstoff wird in der Landwirtschaft als Dünger genutzt.

Der N-Anteil des Grauwassers am gesamten Stickstoff im zu behandelnden Abwasser aus der Siedlung beträgt 7 %. Nach Vorbehandlung und Reinigung in der PKA gelangt der Anteil von 3,5 % vom gesamten Stickstoff in das Gewässer. Die Auswirkungen für das Nährstoffrecyclingpotenzial bei einer Rückführung von Zentrat aus dem Monoverbrennungsblock (inkl. Entwässerung, siehe Tabelle 2) wurden nicht berücksichtigt.

Phosphor

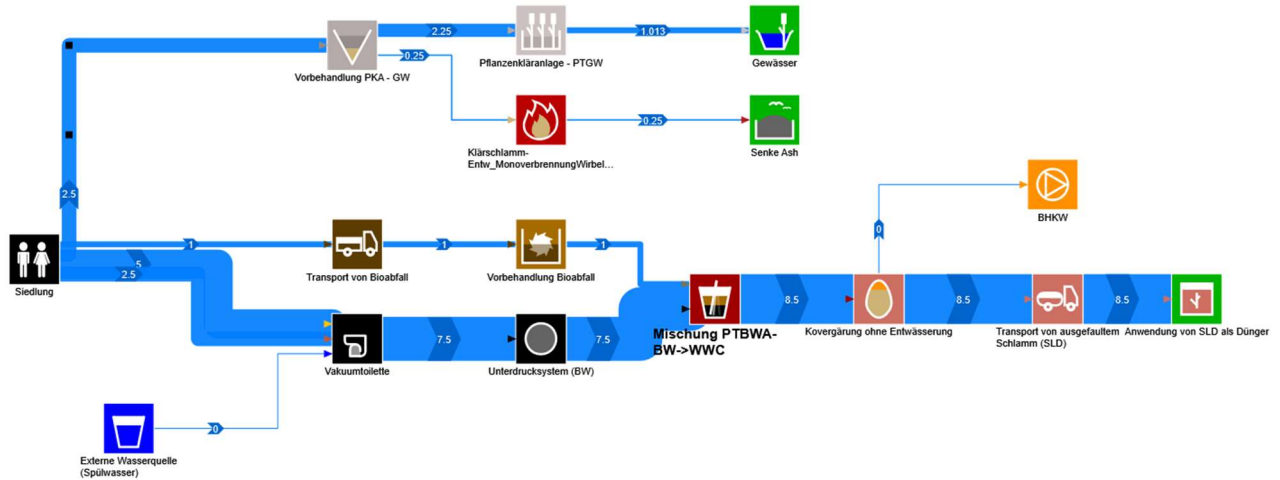


Abbildung 22: Sankey-Diagramm zum Phosphor-Recycling-Potenzial [kg P/d]

Deutlich zu erkennen ist, dass die größte P-Fracht ebenfalls im Teilstrom Urin vorhanden ist. Nach dem Mischen mit Fäzes und Spülwasser in der Vakuumtoilette sind ca. 67 % P-Anteil im Schwarzwasser und ca. 20 % im Grauwasser vorhanden. Ein geringer P-Anteil von ca. 13 % kommt aus den Bioabfällen. Die Hauptwiedernutzung kommt, wie beim Stickstoff (s.o.) nach Vergärung, aus dem Schwarzwasser (+Bioabfall). Ein kleiner P-Anteil wird nach der PKA dem Gewässer zugeführt. Eine Wiedernutzung des Phosphors aus dem Grauwasser ist bilanziell nicht berücksichtigt, da ein P-Recycling aus der Asche aufgrund des mengenmäßig zu geringen Anteils nicht sinnvoll ist.

Kalium

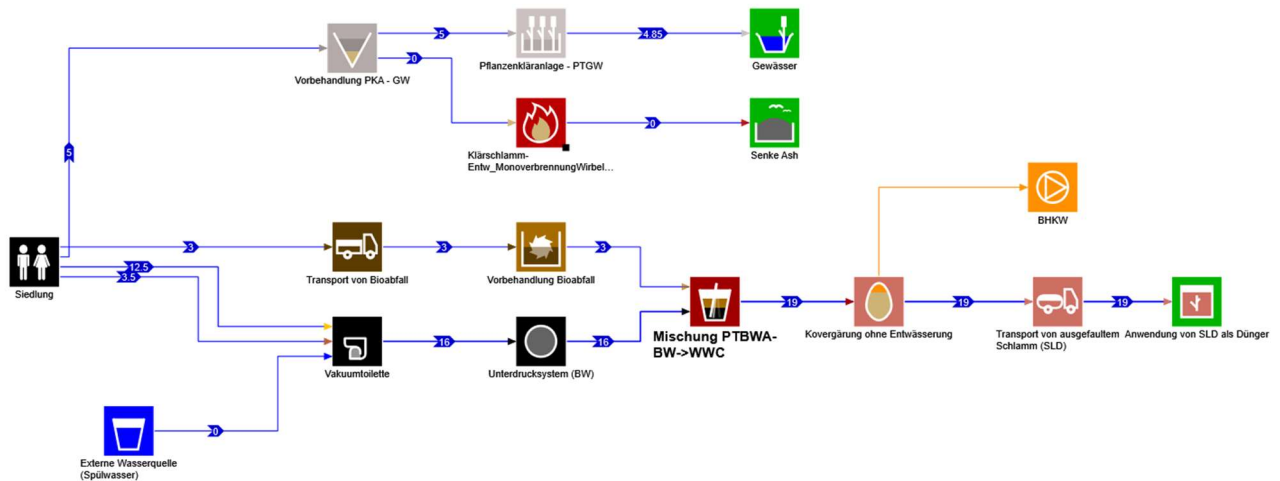


Abbildung 23: Sankey-Diagramm zum Kalium-Recycling-Potenzial [kg K/d]

Der Anteil von Kalium, der ins Gewässer gelangt, ist gegenüber dem N- und P-Anteil mit ca. 20 % deutlich höher. Für Kalium lag nur eine geringe bzw. keine Datenbasis (gerade für die Behandlungsverfahren) vor, so dass die Berechnung mit den vorliegenden Defaultwerten fehlerbehaftet ist.

Anhand der Ergebnisse aus den Sankey-Diagrammen wurden die in REMY (2010) ermittelten Ergebnisse verglichen.

Es zeigt sich, dass SAmPSONS die Nährstoffrückgewinnung im abgebildeten Sanitärsystem gegenüber dem Beispiel V2 von Remy in geringem, für den Vergleich jedoch tolerierbarem Maße unterbewertet. Grund hierfür ist, dass in SAmPSONS das Ergebnis für den verfügbaren Stickstoff, aber auch Phosphor und Kalium aus der Schlamm-Senke (Anwendung von SLD als Dünger) bezogen wird und dass – aufgrund unzureichend zur Verfügung stehender Information – der Parameter in SAmPSONS zum Stickstoffrückgewinnungspotenzial nicht in gleicher Weise eingestellt ist, wie in der Dissertation von REMY (2010). Während die Abweichung von 8 % beim Stickstoff im Rahmen liegt, sind die Abweichungen bei Phosphor und Kalium (siehe s.o.) verbesserungswürdig bzw. vor allem beim Phosphor durch die Nutzung aus der Klärschlammasche die in SAmPSONS nicht berücksichtigt ist, anpassbar. Mit einer zukünftigen Verbesserung der Datenbasis werden positive Veränderungen angestrebt und eine bessere Vergleichbarkeit angestrebt.

Tabelle 3: Vergleich der Nährstoffrecyclingpotenziale aus SAmPSONS und dem Remy-Beispiel (REMY (2010))

	SAmPSONS	Remy V2	Abweichung
Einheit	kg/(EW·a)	kg/(EW·a)	%
N	2,9	3,2	-8,0
P	0,5	0,6	-17,3
K	1,1	1,6	-32,4

Für die Bestimmung der Nährstoffrückgewinnung des Phosphors und Kaliums zeigt sich eine schlechtere Vergleichbarkeit, jedoch ist auch hier die Darstellung für die Verfügbarkeit in der Landwirtschaft abzuwarten. Diese Werte sind in SAmPSONS veränderbar.

3.4.2.6 Chemischer Sauerstoffbedarf - CSB

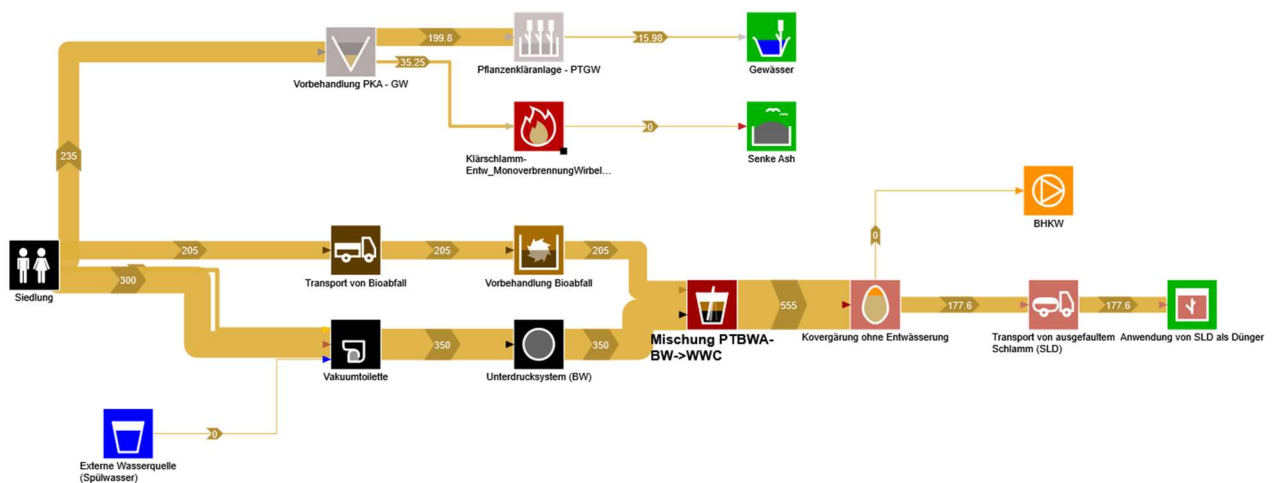


Abbildung 24: CSB-Sankey-Diagramm

Der Summenparameter CSB dient zum einen zur Beurteilung der Schadstoffe im Abwasser und zeigt auf der anderen Seite das energetische Potenzial (Kohlenstoff) des Abwassers an. 38 % des CSB sind in den Fäzes, 6 % im Urin, 30 % im Grauwasser und 26 % im Bioabfall vorhanden. Davon wird der CSB aus dem Grauwasser durch eine PKA gereinigt. Vom Gesamt-CSB werden 2 % ins Gewässer abgegeben (siehe Abbildung 24). 70 % des CSB werden in der Co-Vergärung mit dem Ziel des anaeroben Kohlenstoffabbaus behandelt. Die anaerobe Umsetzung von kohlenstoffreichen Substraten zählt in der Natur zu den wichtigsten Abbauvorgängen. Der Kohlenstoffanteil, der im CSB u.a. wiedergegeben wird, macht die Umwandlung in Biogas als Behandlungsverfahren rentabel. Es wird hier also nicht nur CSB unter dem Aspekt der Reinigung abgebaut, sondern Energiegewinnung betrieben (siehe Kapitel 3.4.2.7). Durch die Mitvergärung kohlenstoffreicher Co-Substrate (Bioabfälle) wird der Energiegewinn gegenüber einer Monovergärung von Schwarzwasser deutlich erhöht. 22,5 % des gesamten CSB aus der Siedlung wird im Dünger in die Landwirtschaft gegeben. Der in Biogas umgewandelte CSB-Anteil beträgt 48 %.

3.4.2.7 Energiebedarf

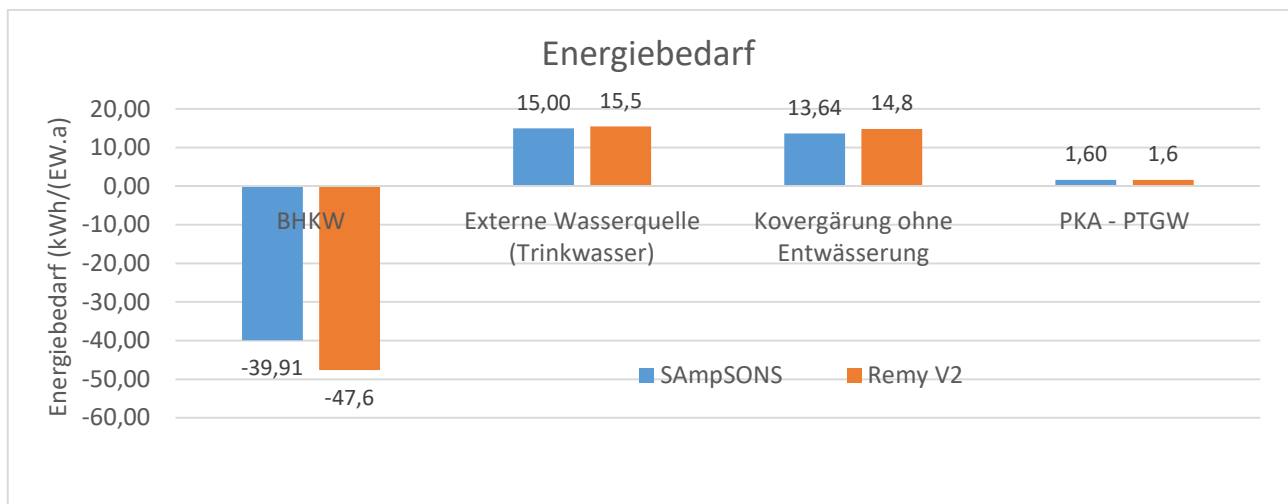


Abbildung 25: Energiebedarf im Vergleich von SAmPSONS und aus dem Remybeispiel (REMY 2010)

Die in REMY (2010) vorhandenen Berechnungen konnten für eine Validierung hinsichtlich der Energiebedarfe der gewählten Verfahrenskombination genutzt werden. Für das BHKW gab SAmPSONS 84 % des Energiebedarfes von REMY (2010) an. Zur Berechnung müssen die Defaultwerte aus dem Steckbrief bei der Berechnungsanwendung kritisch geprüft und ersetzt werden. Der Energiegewinn (negativer Energiebedarf) des BHKWs hängt zum einen vom Wirkungsgrad des BHKWs ab und zum anderen vom im Anaerobverfahren produzierten Biogas. Die Erklärung für die Abweichung von 16 % liegt im unterschiedlichen Wirkungsgrad und der Gasproduktion beider Berechnungen. Bei der Simulation müssen diese Parameter in den Defaulteinstellungen angepasst werden. Der Energiebedarf der externen Wasserquelle (Trinkwasserproduktion und -bereitstellung) sind mit einer geringen Abweichung von 3 % gut vergleichbar. Durch eine Anpassung der Randbedingungen sowie spezifische Betrachtung der Einzeltechnologien waren auf den ersten Blick Optimierungspotenziale zu erkennen, die eine Anpassung ermöglichten. Für die Co-Vergärung passen die ermittelten Werte gut zusammen (Abweichung 8 %). Mögliche Gründe liegen in der durchgeführten Disaggregation aus den Literaturquellen für den Steckbrief. Für den bewachsenen Bodenfilter zeigt die Simulation die

gleichen Ergebnisse hinsichtlich des Energiebedarfes. Allerdings stammen die Defaultwerte auch aus der Quelle REMY (2010).

3.4.2.8 Umweltwirkungen

Für die Umweltwirkungen werden in dem SAmPSONS-Beispiel (siehe Abbildung 20) mit dem Remy-Beispiel (siehe Abbildung 19) folgende Parameter verglichen:

- Eutrophierungspotenzial,
- Treibhauspotenzial,
- Primärenergieeinsatz.

Tabelle 4: Darstellung der Ergebnisse für die Indikatoren Eutrophierungspotenzial, Treibhausgaspotenzial und Primärenergieeinsatz im Vergleich

		SAmpSONS	Remy V2	Abweichung
	Einheit			%
Eutrophierungspotenzial	kg PO ₄ -eq/(EW·a)	0,5	0,54	-0,5
Treibhausgasemissionen	kg CO ₂ -eq/(EW·a)	73,4	75	-2,1
Primärenergiebedarf	MJ/(EW·a)	861,58	750	14,9

3.4.2.9 Eutrophierungspotenzial

Die Ergebnisse sind in Phosphatäquivalenten angegeben und aus ins Verhältnis gesetzten Eutrophierungspotenzialen der Stoffe N, P und CSB berechnet worden (siehe Kapitel 3.4.2.5 und 3.4.2.6). Die Ergebnisse aus SAmpSONS und Remy (2010) sind nahezu gleichwertig und weichen nur um 5 % ab. Deutlich wurde bei den SAmpSONS-Untersuchungen auch, dass die größten Eutrophierungspotenziale im Betrieb der Anlagen liegen und nicht in Herstellung und Bau. Nur 1,5 % fallen auf Herstellung und Bau, 98,5 % werden von den Emissionen im Betrieb der Anlagen hervorgerufen. Beispielhaft werden die N-Emissionen im Betrieb mit 86 % wirksam, während sämtliche Emissionen aus der Stahl und Betonherstellung zusammen nur 1,3% ausmachen und innerhalb des Eutrophierungspotenzials aus der Herstellung und Bau fast 90 % ausmachen.

3.4.2.10 Treibhauspotenzial

Beim Treibhauspotenzial weichen die Ergebnisse im Vergleich der beiden Untersuchungen um 2,1 % ab. Das spiegelt eine sehr gute Vergleichbarkeit wider. Insbesondere sind hier Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) in die Berechnungen eingegangen. Die Angabe erfolgt in Kohlendioxidäquivalenten. Vergleicht man in SAmpSONS die Auswirkungen des Betriebs mit Herstellung und Bau, zeigt sich eine etwas gleichmäßigere Verteilung. Der Anteil von Herstellung und Bau beträgt 30 % und auf den Betrieb entfallen 70 %. Bezogen auf den Betrieb resultieren 65 % aus dem Dieserverbrauch beim Transport; bezogen auf Herstellung und Bau werden 28 % den Materialien Stahl und Beton zugeordnet.

3.4.2.11 Primärenergieeinsatz

Beim Primärenergieeinsatz ergibt sich die größte Abweichung zwischen den untersuchten Berechnungsvarianten. Die entnommene Energie wird in MJ pro Einwohner und Jahr angegeben und weicht zwischen SAmpSONS und Remy um 15 % ab, wobei SAmpSONS einen höheren Primärenergiebedarf ausweist. Bis zur Fertigstellung des Abschlussberichtes konnte der Grund hierfür nicht geklärt werden, er wird in einer beantragten Verlängerungsphase weiter untersucht. Der Betrieb hat am Primärenergiebedarf einen Anteil von 76 % (Diesel davon 85 %). Herstellung und Bau haben entsprechend einen Anteil von 24 % (Stahl und Beton davon 71 %). Die

Energieproduktion im BHKW wurde mit -27 % negativ bilanziert. Der Betrieb hat am Primärenergiebedarf einen Anteil von 24 %. Herstellung und Bau haben entsprechend einen Anteil von 76 %. Stahl und Beton haben einen Anteil von 17 % und der Transport (Diesel) macht 85 % aus, wobei die Energieproduktion im BHKW mit -27 % negativ bilanziert wurde.

3.4.2.12 Fazit

Hinsichtlich des Nährstoffrückgewinnung und des Energiebedarfes wurde an einem Beispiel von REMY (2010) die Validierung von SAmpSONS vorgenommen. Dabei zeigten sich im Wesentlichen gute Vergleichbarkeiten (Nährstoffrückgewinnung N, P und K, Energiebedarf, Umweltwirkungen). Die Unterschiede schwanken hier in einem Rahmen von < 10 % und sind für eine Vorplanung tolerierbar. Gründe für größere Abweichungen haben sich zuordnen lassen und wurden benannt bzw. konnten im Wesentlichen behoben werden.

3.4.3 Fallbeispiel 3: Ressourcenorientierte Sanitärsysteme (ROSS) – Eine Bilanzierung von Nährstoffen, Energieverbrauch und CO₂-Emission (BCE)

Dieses Fallbeispiel basiert auf einem Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KA-1.6 „Bemessungshinweise“ im Fachausschuss KA-1 „Neuartige Sanitärsysteme“, veröffentlicht in der KA Korrespondenz Abwasser, Abfall (DWA 2017) (im Folgenden „DWA-Arbeitsbericht“). Beispielhaft werden hier verschiedene Varianten – zwei Gelbwassersysteme und ein Schwarzwassersystem – gegenübergestellt und mit einer konventionellen Abwasserreinigung (Referenzsystem) anhand vereinfachter Stoff- und Energiebilanzen verglichen (jeweils 50.000 EW). Für die Auswertungen lag dem Projektteam nicht nur der veröffentlichte Artikel vor, sondern auch eine MS Excel-Datei mit den ergebnisrelevanten Hintergrundrechnungen. Diese wurden ebenfalls für den Vergleich berücksichtigt.

Für die Validierung eignen sich insbesondere zwei der vier vorgestellten Abwassersysteme, das konventionelle System (Referenzsystem) und das System 3, ein Zwei-Strom-System (Trennung von Grauwasser und Schwarzwasser) (vgl. Abbildung 26). Der DWA-Arbeitsbericht enthält Angaben zu N- und P-Fracht der Systeme sowie Auswertungen zu den Umweltindikatoren Primärenergiebedarf und CO₂-Äquivalenten, die den Ergebnissen von SAmpSONS gegenübergestellt wurden. Zudem erfolgte im DWA-Arbeitsbericht eine Bilanzierung pflanzenverfügbarer Nährstoffe, welche sich derzeit nicht in SAmpSONS abbilden lässt (geplant für Folgejahr).

3.4.3.1 Darstellung der Systeme

Abbildung 26 zeigt eine Darstellung der beiden Systeme als Fließbild.

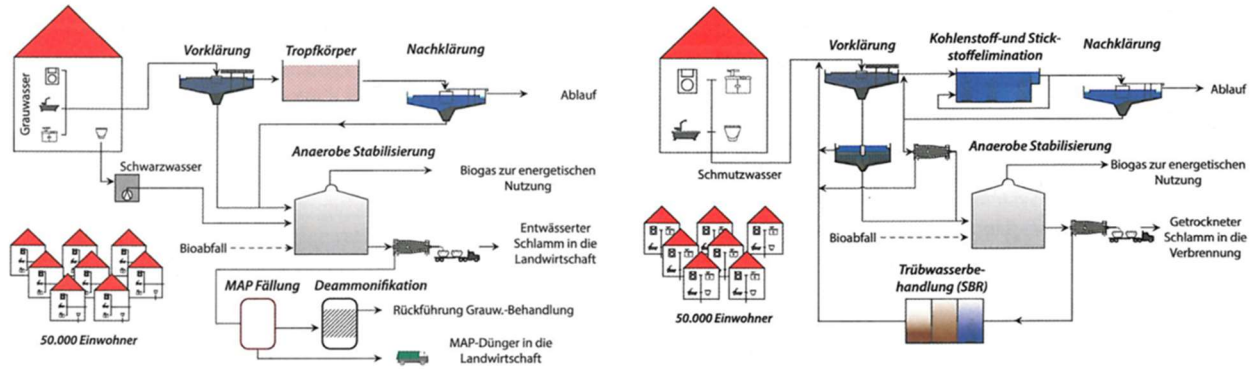


Abbildung 26: Fließbild des Systems 3 (li.) und des Referenzsystems (re.) (DWA 2017)

Folgende Annahmen wurden im DWA-Arbeitsbericht getroffen:

50.000 Einwohner (EW), kommunales Haushaltsabwasser ohne Industrieinfluss, zentrale Abwasserbehandlung mit 100 % Präsenz der EW, 30 % Fremdwasserzuschlag über alle Systeme. Diese Annahmen wurden analog in SAMPSONS implementiert. Auch die Schmutzwassermengen und –frachten wurden verglichen und ggf. angepasst.

Tabelle 5 zeigt den Vergleich der in SAMPSONS verwendeten Technologien mit denen, die im DWA-Arbeitsbericht beschrieben sind. In Abbildung 27 und Abbildung 28 ist die Nachbildung in SAMPSONS dargestellt.

Tabelle 5: Darstellung der Fallbeispiele in SAMPSONS und Vergleich mit den im DWA-Arbeitsbericht beschriebenen Technologien

Referenzsystem		System 3	
Komponenten	Abbildbar in SAMPSONS	Komponenten	Abbildbar in SAMPSONS
Mengen und Frachten	ja	Mengen und Frachten	ja
Konv. Spültoiletten	ja*1	Unterdrucktoiletten	ja*1
Transport im Kanal	ja	Getrennte Ableitung der Teilströme	ja*1
Fremdwassereintrag	ja	Transport GW im Kanal	ja
Kläranlage		Transport SW im Unterdrucksystem	ja
a) Mechanische Vorreinigung	ja	Fremdwassereintrag	ja
b) Biologische Behandlung	ja	Grauwasserbehandlung	ja
c) Schlammbehandlung		Zuführung von Schlamm aus Grauwasserbehandlung in Schwarzwasserbehandlung	ja
• Eindickung	Nein 3)	Vergärung Schwarzwasser	ja
a) Faulung	ja	Nutzung Faulgas	ja
b) Entwässerung	ja	Schlammbehandlung	
c) Trocknung	ja	d) Entwässerung (integriert im Block Anaerobvergärung)	ja
Trübwasserbehandlung (SBR)	nein	e) Wasserbehandlung (MAP-Fällung, Deammonifikation)	Nein 3)
Monoverbrennung	ja*2		

Nutzung Faulgas	ja	Verwertung Schlamm als Düngemittel	nein
Behandlung Prozesswasser aus Schlammmentwässerung	Nein ³⁾	Verwertung Fällprodukt als Düngemittel	nein

*1 Im DWA-Arbeitsbericht nicht berücksichtigt da Infrastruktur nicht erfasst.

*2 Derzeit liegen in SAmPSONS die Verfahren Entwässerung, Faulung, Trocknung und Monoverbrennung nur aggregiert vor. Aus diesem Grund sind diese Verfahrensstufen gesamthaft in die Darstellung in SAmPSONS integriert.

*3 in SAmPSONS2: Ja

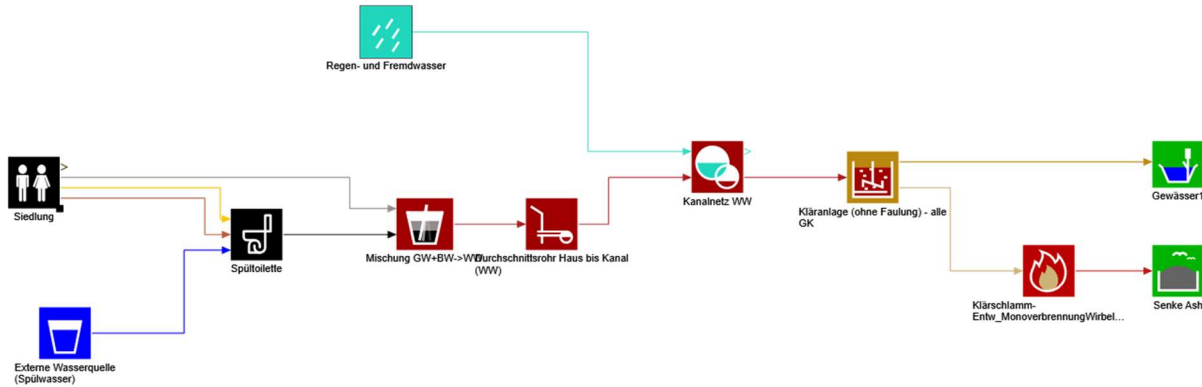


Abbildung 27: Abbildung des Referenzsystems in SAmPSONS.

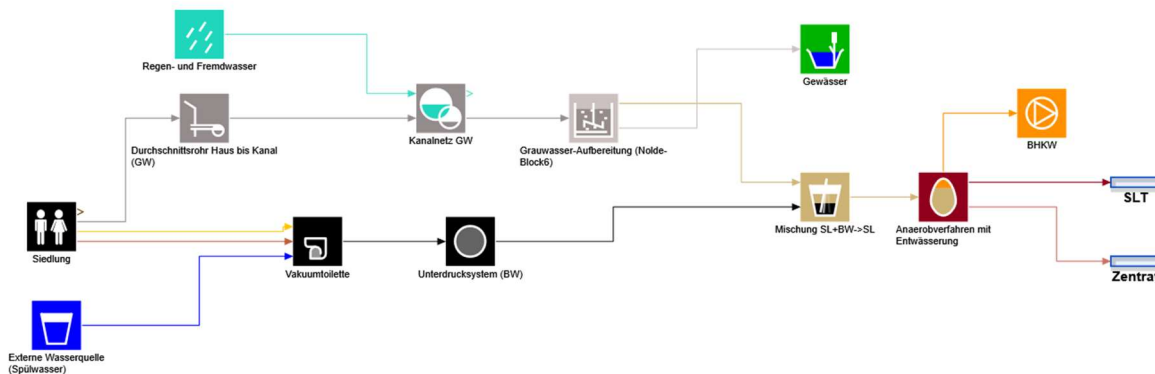


Abbildung 28: Abbildung von System 3 in SAmPSONS.

3.4.3.2 Vergleich der Stickstoff-Bilanzen

Referenzsystem

Tabelle 6: Vergleich der N-Frachten des Referenzsystems am Ausgang der Kläranlage.

N-Fracht am Ausgang der	SAmPSONS	DWA-Arbeitsbericht
Schlamm [kg/d]	173,1	91
Gewässer [kg/d]	40,01	110,6

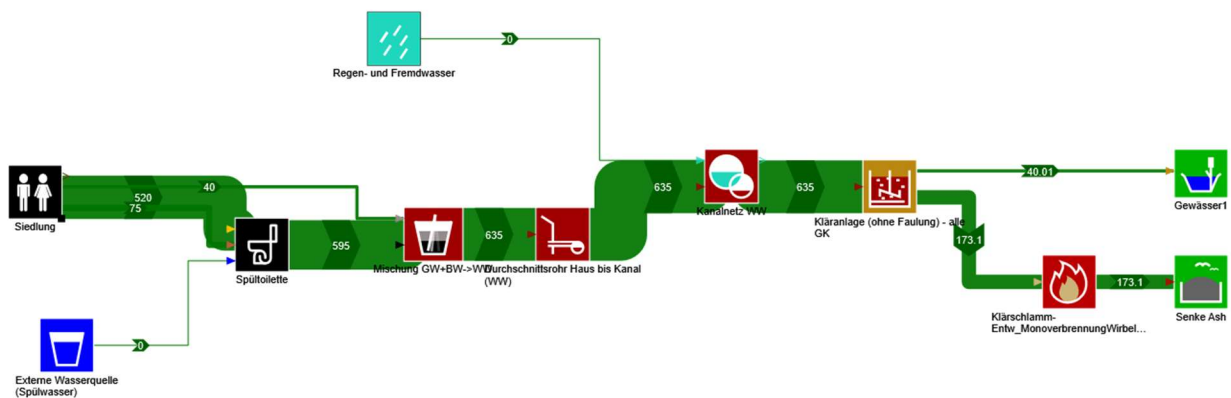


Abbildung 29: Darstellung der N-Frachten des Referenzsystems im Sankey-Diagramm [kg/d].

Abbildung 29 zeigt den Verlauf der Stickstofffracht im Referenzsystem als Sankey-Diagramm. Die Zulaufwerte zur Kläranlage sind nahezu identisch (SAmPSONS 635 kg/d, DWA-Arbeitsbericht 645 kg/d). Eine geringe Abweichung der Zulaufwerte ergibt sich durch die Rückführung des Prozesswassers in den Zulauf der Vorklärung (zusätzlich 10 kg/d N), der im DWA-Arbeitsbericht berücksichtigt wurde.

N-Fracht Schlamm: Entsprechend der voreingestellten Default-Werte des Kläranlagen-Steckbriefes in SAmPSONS verbleiben von der N-Fracht im Zulauf 27 % im Schlamm. Hier liegt das Ergebnis in SAmPSONS am Ausgang der Kläranlage um rund 82 kg/d höher als im DWA-Arbeitsbericht (siehe Tabelle 6).

Die Analyse der Daten zeigt, dass die Differenz der N-Fracht im Schlamm auf Unterschieden in der Kläranlage basiert:

1. Unterschiedliche Annahmen bezüglich der N-Elimination: Es zeigt sich, dass im DWA-Arbeitsbericht eine höhere N-Elimination in der Kläranlage angenommen wurde. Diese liegt bei ca. 75 % (SAmPSONS 70 %). Bei einer entsprechenden Anpassung in SAmPSONS ergibt sich eine N-Fracht im Schlamm von 131 kg/d (DWA Arbeitsbericht 134 kg/d im Überschussschlamm).
2. Unterschiedliche Annahmen bezüglich der Schlamm bzw. Prozesswasserbehandlung: Im DWA-Arbeitsbericht wird eine Trübwasserbehandlung des Prozesswassers (SBR) vorgenommen. Diese führt zu einem zusätzlichen N-Abbau von 33 kg/d N. Der verbleibende Rest wird dem Zulauf der Kläranlage zugeführt (10 kg/d N). Eine separate Integration des SBR-Verfahrens ist derzeit in SAmPSONS nicht möglich, da das Verfahren nicht als Modul zur Verfügung steht. Dennoch lässt sich diese zusätzliche N-Elimination in SAmPSONS berücksichtigen. Dadurch ergibt sich eine N-Fracht im Schlamm von ca. 100 kg/d in SAmPSONS gegenüber 91 kg/d im DWA-Arbeitsbericht (vgl. Tabelle 7). Die verbleibende Differenz ist auf die Rückführung des Prozesswassers zurückzuführen.

N-Fracht Gewässer: Der Wert für die Reinigungsleistung der Kläranlage liegt im DWA-Arbeitsbericht bei etwa 83 % (Default-Wert in SAmPSONS bei ca. 93 %). Dieser Wert wurde in SAmPSONS übernommen, was zu vergleichbaren Ablaufwerten führt (siehe Tabelle 7). Eine

geringe Differenz ergibt sich durch Rundungsfehler sowie die zusätzliche N-Fracht im DWA-Arbeitsbericht durch die Rückführung des Prozesswassers (zusätzlich 10 kg/d N). Abbildung 30 zeigt die Darstellung im Sankey-Diagramm nach Anpassung der N-Reinigungsleistung und N-Elimination.

Tabelle 7: Vergleich der N-Frachten des Referenzsystems am Ausgang der Kläranlage nach Anpassung der N-Reinigungsleistung und der N-Elimination.

N-Fracht am Ausgang der	SampSONS	DWA-Arbeitsbericht
Schlamm [kg/d]	100,1	91
Gewässer [kg/d]	108	110,6

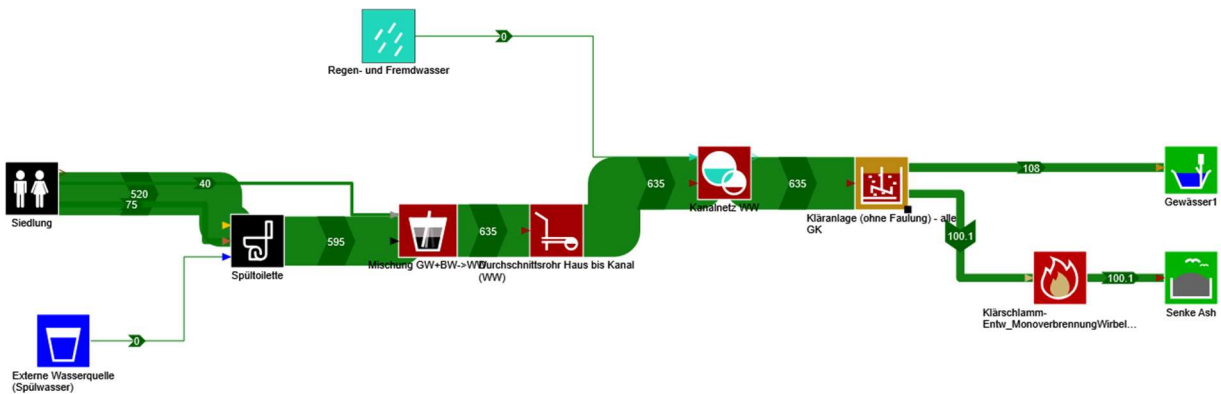


Abbildung 30: Darstellung der N-Frachten des Referenzsystems im Sankey-Diagramm nach Anpassung der N-Reinigungsleistung und der N-Elimination [kg/d].

System 3

Tabelle 8: Vergleich der N-Frachten von System 3 an den Senken.

N-Fracht	SAMPSONS	DWA-Arbeitsbericht
Zentrat [kg/d]	558,2	569,7
Entwässerter Schlamm [kg/d]	62,02	63,1
Gewässer [kg/d]	14,8	0

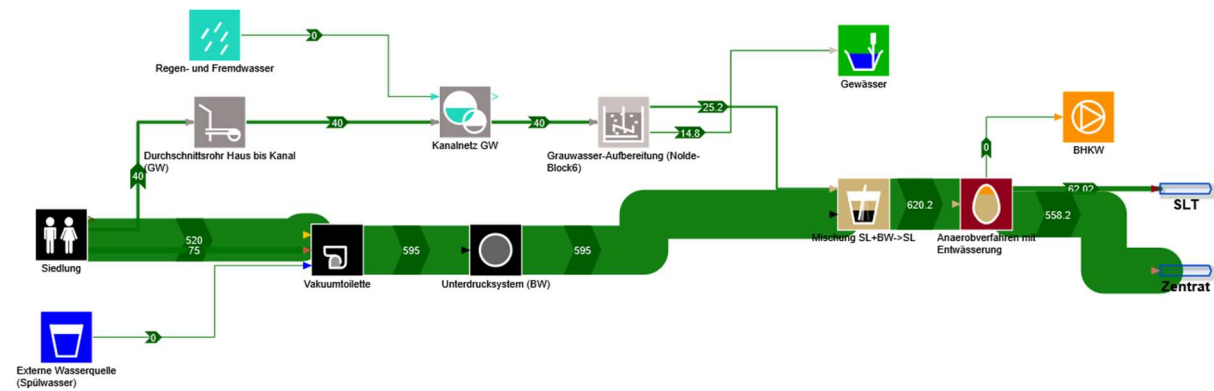


Abbildung 31: Darstellung der N-Frachten von System 3 im Sankey-Diagramm [kg/d].

Auf Basis der in SAmPSONS Default-Werte zeigen sich Unterschiede bezüglich der Einträge ins Gewässer (Ablauf) und bezüglich der Schlamm-Frachten (vgl. Tabelle 8). Im DWA-Arbeitsbericht wird das Prozesswasser aus der Deammonifikation wieder dem Zulauf der Vorklärung der GW-Aufbereitung zugeführt. Dadurch erhöht sich die täglich anfallende Menge im GW-Strom im DWA-Arbeitsbericht für Stickstoff um 53,9 kg/d. Hinzu kommen Unterschiede bei den Verfahren der GW-Aufbereitung. Im DWA-Arbeitsbericht wird eine Vorklärung, eine biologischen Stufe mittels Festbettsystem (Tropfkörper) und eine nachgeschalteter Sedimentation angenommen. In SAmPSONS besteht das Verfahren aus der Vorreinigung über Siebe, der biologischen Reinigung mittels mehrstufigem Wirbelbettverfahren mit anschließendem Sandfilter, gefolgt von einer UV-Desinfektion. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Reinigungsleistungen. Im DWA-Arbeitsbericht wird zudem von einer vollständigen Inkorporation des Stickstoffs aus dem GW in die Biomasse ausgegangen, was dazu führt, dass kein Stickstoffeintrag ins Gewässer stattfindet. Nach einer entsprechenden Anpassung in SAmPSONS (Reinigungsleistung 100 %; Default SAmPSONS 63 %; 40 % des entfernten N gehen in den Schlamm, 60 % N-Elimination) ergeben sich die in Tabelle 9 bzw. Abbildung 32 dargestellten Werte. Differenzen beim Zentrat ergeben sich durch die beschriebene Rückführung des Prozesswassers. Zusammenfassend zeigt sich auch beim Vergleich von System 3, dass durch die Anpassungen von Default-Werten in SAmPSONS weitgehende Übereinstimmung der N-Bilanzen im System erreicht werden kann.

Tabelle 9: Vergleich der N-Frachten von System 3 an den Senken (Gewässer, Zentrat, entwässerter Schlamm) nach Anpassung der GW-Behandlung.

N-Fracht	SAmPSONS	DWA-Arbeitsbericht
Zentrat [kg/d]	549,9	569,7
Entwässerter Schlamm [kg/d]	61,1	63,1
Gewässer [kg/d]	0	0

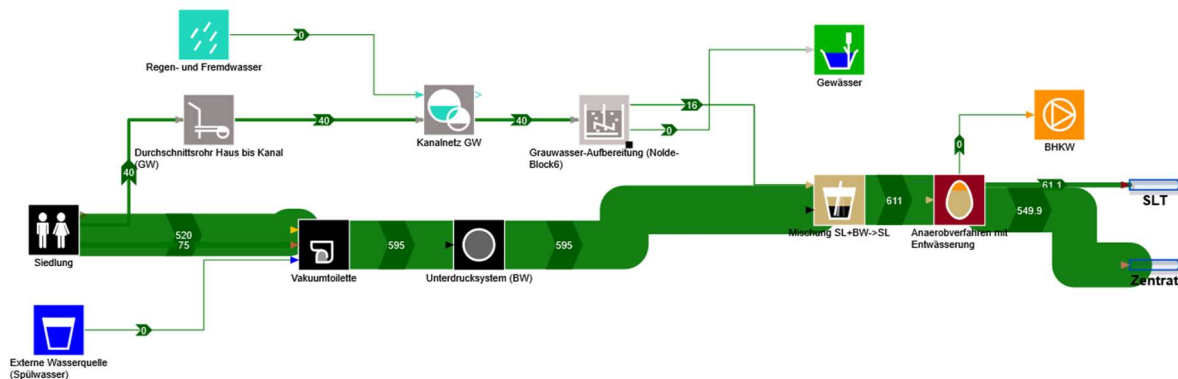


Abbildung 32: Darstellung der N-Frachten von System 3 im Sankey-Diagramm nach Anpassung der GW-Behandlung [kg/d].

3.4.3.3 Vergleich der Phosphor-Bilanzen

Referenzsystem

Tabelle 10: Vergleich der P-Frachten des Referenzsystems im Ausgang der Kläranlage.

P-Fracht am Ausgang der	SAmPSONS	DWA-Arbeitsbericht
-------------------------	----------	--------------------

Schlamm [kg/d] (Jeweils am Ausgang der	95,7	94,4
Gewässer [kg/d]	4,3	6,8

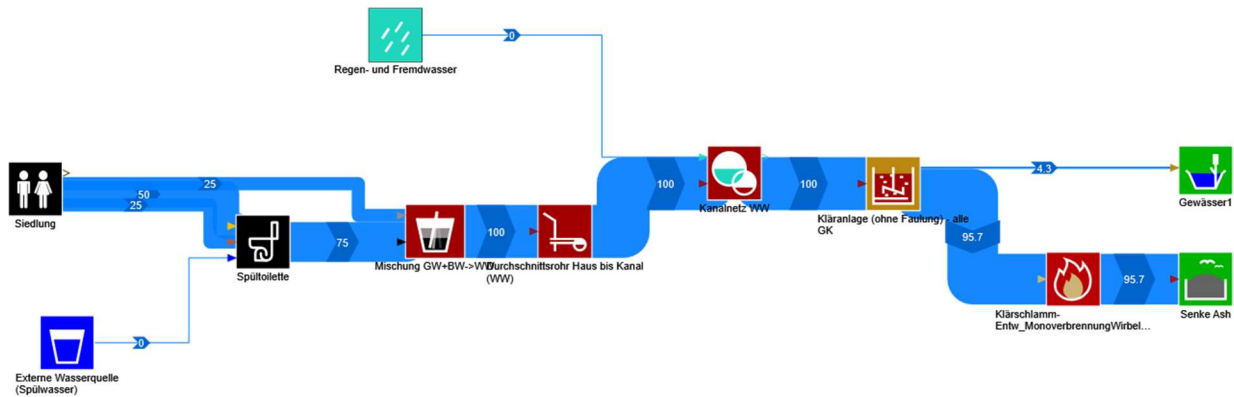


Abbildung 33: Darstellung der P-Frachten des Referenzsystems im Sankey-Diagramm [kg/d].

In Abbildung 33 wird der Verlauf der Phosphorfracht im Referenzsystem als Sankey-Diagramm dargestellt (vgl. auch Tabelle 10). Die Zulaufwerte zur Kläranlage sind nahezu identisch.

P-Fracht Gewässer: Die Reinigungsleistung der Kläranlage im Referenzsystem beträgt im DWA-Arbeitsbericht etwa 94 % (Default-Wert in SAmPSONS bei 95,7 %). Dieser Wert wurde in SAmPSONS übernommen, was zu vergleichbaren Ablaufwerten führt. Eine geringe Differenz ergibt sich durch Rundungsfehler.

P-Fracht Schlamm: Hier stimmen die Werte (nach Anpassung der Reinigungsleistung) nahezu überein (siehe Tabelle 11 bzw. Abbildung 34). Die geringe Differenz lässt sich auf unterschiedliches Vorgehen bei der Berechnung und Rundungsfehler zurückführen.

Tabelle 11: Vergleich der P-Frachten am Ausgang der Kläranlage.

P-Fracht am Ausgang der	SAmPSONS	Fallbeispiel
Schlamm [kg/d]	94	94,4
Gewässer [kg/d]	6	6,8

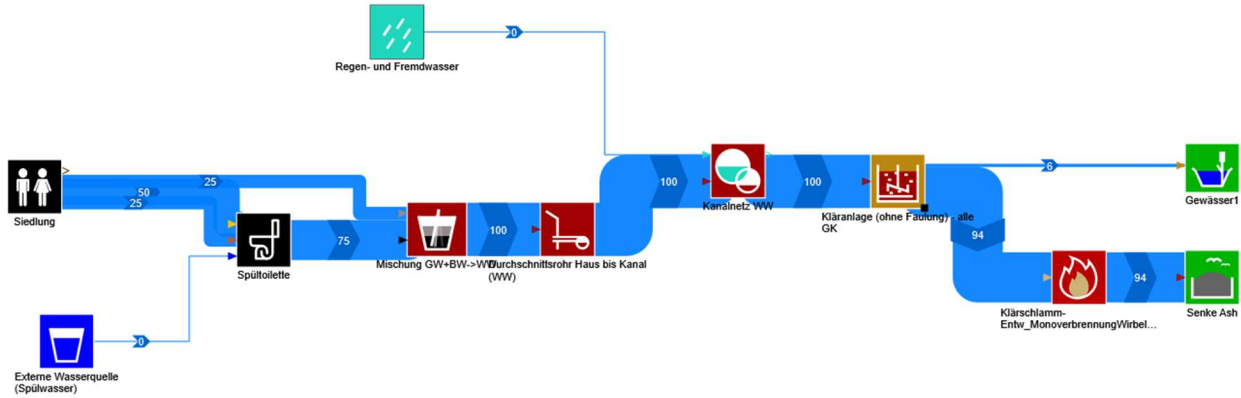


Abbildung 34: Darstellung der P-Frachten im Referenzsystem nach Anpassung der Reinigungsleistung [kg/d].

System 3

Tabelle 12: Vergleich der P-Frachten im System 3.

P-Fracht	SAmPSONS	Fallbeispiel
Zentrat [kg/d]	55,74	67,3
Entwässerter Schlamm [kg/d]	22,77	27,6
Gewässer [kg/d]	21,5	5

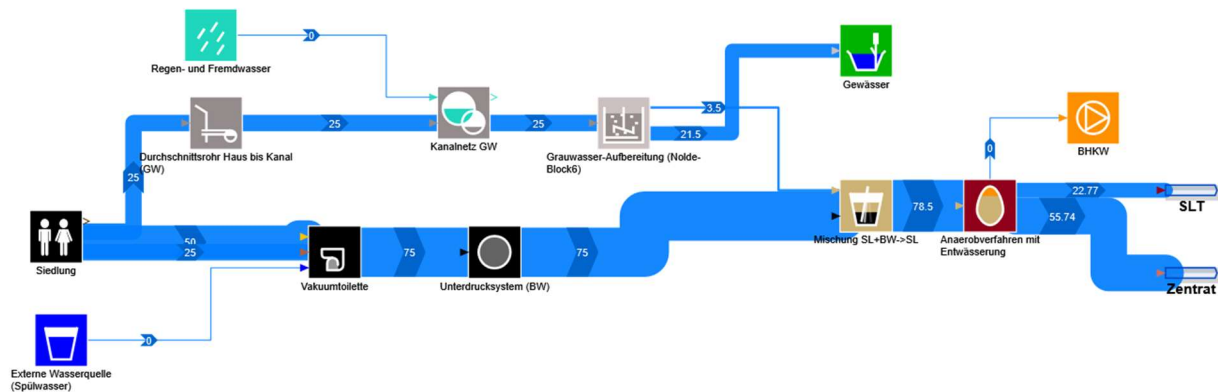


Abbildung 35: Darstellung der P-Frachten von System 3 im Sankey-Diagramm [kg/d].

In Tabelle 12 bzw. Abbildung 35 sind die P-Frachten von System 3 dargestellt. Die bereits beschriebenen Unterschiede bzgl. der GW-Behandlung werden auch hier deutlich. Nach einer Anpassung der Reinigungsleistung (GW-Behandlung P-Reinigungsleistung 80 %) ergeben sich nahezu identische Werte für die beiden Technologien (siehe Abbildung 36 bzw. Tabelle 13).

Tabelle 13: Vergleich der P-Frachten von System 3 nach einer Anpassung der Reinigungsleistung.

P-Fracht	SAmPSONS	Fallbeispiel
Zentrat [kg/d]	67,45	67,3
Entwässerter Schlamm [kg/d]	27,55	27,6
Gewässer [kg/d]	5	5

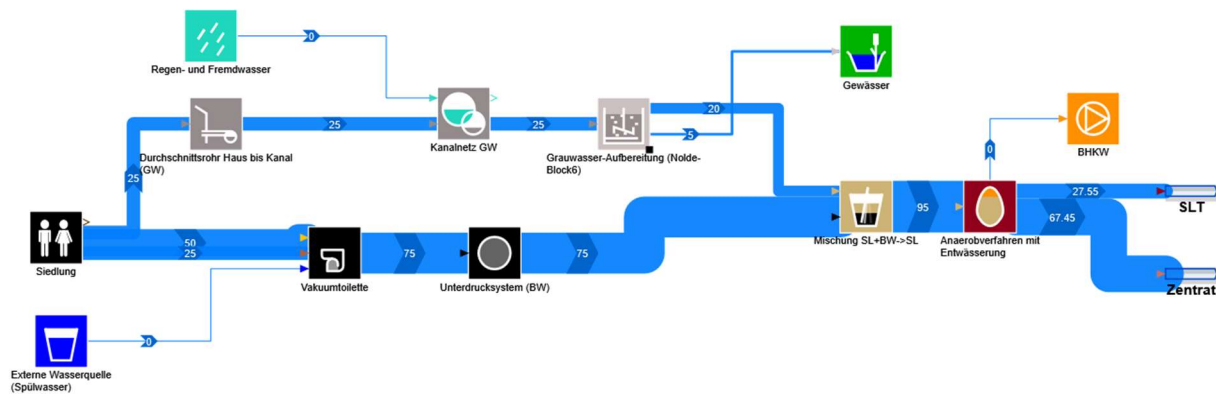


Abbildung 36: Darstellung der P-Frachten von System 3 im Sankey-Diagramm nach Anpassung der GW-Reinigungsleistung [kg/d].

3.4.3.4 Vergleich der potenziellen Umweltwirkungen Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen

Der DWA-Arbeitsbericht beinhaltet eine Bewertung der unterschiedlichen Abwassersysteme hinsichtlich der Umweltindikatoren Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen. Im Folgenden wird ein Vergleich dieser Ergebnisse mit den SAmPSONS-Auswertungen durchgeführt (siehe auch Tabelle 14 und Tabelle 15). Beim Vergleich mit der Excel-Datei, die dem veröffentlichten Artikel zugrunde liegt, fiel auf, dass an zwei Stellen ein Vorzeichenfehler vorlag (siehe gelbe Felder in Tabelle 14), der die Ergebnisse im Vergleich zu Abb. 7 und Abb. 8 im Artikel geringfügig verändert.

Die Ergebnisinterpretation wird dahingehend erschwert, dass das im DWA-Arbeitsbericht beschriebene Referenzsystem und das System 3 in SAmPSONS nicht 1:1 abgebildet werden können. Bzgl. des Referenzsystems gilt, dass in SAmPSONS1 kein Fällmitteleinsatz und auch der Prozess der Schlammverdickung nicht berücksichtigt werden. Für System 3 gilt, dass die Behandlungsschritte MAP-Fällung und Deammonifikation für das Prozesswasser aus der Anaerobstufe in SAmPSONS1 nicht abgebildet werden können. Ferner waren in SAmPSONS1 die Verwertungsprozesse von Schlamm zu Düngemitteln noch nicht integriert.⁵ Im genannten DWA-Arbeitsbericht werden keine für den Bau der Systeme notwendigen Infrastrukturaufwendungen berücksichtigt. Zudem ist im Referenzsystem die Verbrennung des getrockneten Schlammes inkl. der damit verbundenen Strom- und Wärmegutschriften außerhalb des Bilanzrahmens. Darüber hinaus werden weder die Bereitstellung von Trinkwasser als Spülwasser noch die bei den diversen Behandlungssystemen entstehenden CH₄ und N₂O Emissionen berücksichtigt (siehe dazu auch Tabelle 5).

Die Analyse der Ergebnisse zeigt, dass – im Gegensatz zu den Annahmen im DWA-Arbeitsbericht und anderen Publikationen – die potenziellen Umweltwirkungen der Infrastrukturaufwendungen von Abwassersystemen zwar im Vergleich zum Betrieb der Systeme nicht groß, aber dennoch nicht

⁵ In SAmPSONS2 konnten die hier erwähnten Einschränkungen behoben werden. Ein entsprechendes Update dieses Fallbeispiels wurde in Projektphase 2 allerdings nicht durchgeführt.

vernachlässigbar sind. So entfallen in SAmpSONS für das Referenzsystem ca. 83 % der gesamten Treibhausgase auf den Betrieb der Systeme (Stromverbrauch inkl. Strom- und Wärmegewinn durch Klärschlammverwertung, die Bereitstellung von Trinkwasser als Spülwasser sowie direkte Emissionen (CH_4 und N_2O)), während 17 % auf die Errichtung der Infrastruktur entfallen. Bzgl. des Indikators Primärenergiebedarf (PE) machen die Infrastrukturaufwendungen sogar knapp 29 % des gesamten Primärenergiebedarfs aus. Nennenswerte Beiträge liefern dabei im Referenzsystem die Rohrverbindungen von Haus bis Kanal (THG 6 %; PE 11 %), die Produktion der Spültoiletten (THG 3 %; PE 10 %) und den Bau des Kanals (THG 3,1 %; PE 4 %), die Errichtung des aggregierten Verfahrensblocks Entwässerung, Vergärung, Trocknung und Monoverbrennung von Klärschlamm (THG 2,3 %; PE 1,4 %) sowie der Betonanteil der Kläranlage (THG 1,6 %; PE 0,7 %). Für das System 3 ist diese Analyse aufgrund der stark die Ergebnisse beeinflussenden Energiegutschriften unübersichtlicher, dennoch machen auch hier die Infrastrukturaufwendungen bezogen auf den Stromverbrauch der Systeme ca. 15 % (THG) bzw. 21 % (PE) aus (siehe auch Tabelle 15). Zwar ist anzumerken, dass diese Daten teilweise auf unsicheren Grundlagen beruhen und daher eher konservativ abgeschätzt wurden, allerdings besteht zumindest Grund für die Vermutung, dass die Infrastrukturaufwendungen nicht so unbedeutend sind wie gemeinhin angenommen. Insofern stellen diese Daten in den Verfahrensblöcken von SAmpSONS eine sinnvolle Ergänzung dar und unterstützen das angestrebte Lebenszyklusdenken für den Vergleich von konventionellen und alternativen Abwassersystemen.

Die Auswertung in SAmpSONS zeigt darüber hinaus, dass die Methan- und Lachgasemissionen während der Abwasserbehandlung in der Kläranlage im Referenzsystem zu einem signifikanten Anteil (ca. 40 %) zu den Gesamttreibhausgasemissionen beitragen. Auch in System 3 entstehen nach den im SAmpSONS-Projekt gesammelten Daten für die Verfahrensblöcke GW-Behandlung, Anaerobverfahren und Blockheizkraftwerk (BHKW) N_2O - und CH_4 Emissionen, die einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamt-THG-Bilanz haben (siehe Tabelle 15). Im DWA-Arbeitsbericht sind diese Emissionen nicht berücksichtigt worden. Auch hier ist allerdings auf die Unsicherheit der verwendeten Daten hinzuweisen.

3.4.3.5 Spezifische vergleichende Analyse des Referenzsystems

Eine genauere Analyse der potenziellen Umweltwirkungen des Referenzsystems verursacht durch die Stromverbräuche zeigt, dass die Ergebnisse des DWA-Arbeitsberichts durchaus mit den Ergebnissen in SAmpSONS vergleichbar sind. Insgesamt betragen die Treibhausgasemissionen verursacht durch die Stromverbräuche für die einzelnen Abwasserbehandlungsstufen 733 t $\text{CO}_2\text{-e/a}$; der Primärenergieverbrauch beträgt 3.646 MWh/a. In SAmpSONS beträgt der Vergleichswert 957 t $\text{CO}_2\text{-e/a}$ bzw. 4.760 MWh/a (bei gleichen Charakterisierungsfaktoren für Strom wie im DWA-Arbeitsbericht). In SAmpSONS wurden diese Werte auf Basis des durchschnittlichen Stromverbrauchs einer Kläranlage der Größenklasse 4 ermittelt. Im DWA-Arbeitsbericht wurden die einzelnen Verbräuche je Behandlungsstufe sehr detailliert erhoben. Da es sich bei dem in SAmpSONS verwendeten Wert um einen Durchschnittswert handelt, dem eine gewisse Schwankungsbreite unterliegt, wird die Abweichung der Ergebnisse als vertretbar angesehen. Zudem bewegen sich THG- und PE-Ergebnisse im DWA Arbeitsbericht und in SAmpSONS in den gleichen Größenordnungen und zeigen die gleichen relativen Unterschiede auf. Es sei auch hier erneut darauf hingewiesen, dass bei genaueren Kenntnissen der Stromverbrauchswerte, diese in SAmpSONS über Eingabewerte angepasst werden können.

Die Treibhausgasemissionen und der Primärenergieverbrauch durch die Stromverbräuche der Schlammbehandlung inklusive der Energiegewinne (Strom und Wärme) aus der Faulgasverbrennung betragen im DWA-Arbeitsbericht -71 t CO₂-e/a bzw. -374 MWh/a. In SAmpSONS werden Werte von -252 t CO₂-e/a bzw. -1.243 MWh/a auf Basis eines kombinierten Verfahrenssteckbriefes zur Klärschlammbehandlung bestehend aus Faulung, Entwässerung, Trocknung und Verbrennung berechnet. Der errechnete Wert in SAmpSONS beruht auf einer detaillierten Ökobilanz, die für diese Verfahrensschritte erstellt wurde (Fehlenbach und Reinhard 2009). In dem DWA-Arbeitsbericht wurden für die einzelnen spezifischen Verfahrensschritte Daten gesammelt, diverse Berechnungen angestellt und ausgewertet. Ein wesentlicher Unterschied der Ergebnisse lässt sich durch die Tatsache erklären, dass im DWA-Arbeitsbericht die Verbrennung des getrockneten Klärschlammes und die damit verbundenen Strom- und Wärmegutschriften nicht berücksichtigt wurden. Diese würden zu größeren negativen Treibhausgasemissionen bzw. Primärenergieverbräuchen führen, da die Energiegewinne der Klärschlammverbrennung zu Gutschriften für Strom und Wärme führen. Das Delta der Ergebnisse aus DWA-Arbeitsbericht und SAmpSONS würde so kleiner werden. Zudem können verschiedene Annahmen zur Klärschlammmentwässerung, -trocknung und -transport bzw. die Verwendung unterschiedlicher Hintergrunddaten einen Beitrag zu Ergebnisunterschieden liefern. Wieder ist zu beobachten, dass die relativen Ergebnisunterschiede bezogen auf THG und PE nahezu gleich sind.

Tabelle 14: Vergleich potenzielle Umweltwirkungen (Treibhausgasemissionen und Primärenergiebedarf) Referenzsystem gegenüber Auswertungen in SAmPSONS

	Treibhausgasemissionen				Primärenergiebedarf			
	Referenzsystem KA-Artikel		Referenzsystem SAmPSONS		Referenzsystem KA-Artikel		Referenzsystem SAmPSONS	
Stromverbrauch	[t/a]	960			MWh/a	4.774		
BSB-Elimination	[t/a]	390				1.939		
N-Elimination	[t/a]	313				1.554		
P-Fällung	[t/a]	5				24		
SBR								
Prozesswasserbehandlung	[t/a]	26				129		
Schlammwässerung	[t/a]	18				91		
Trockner	[t/a]	209				1.037		
Stromgewinn durch Verbrennung Faulgas	[t/a]	-301				-1.497		
Wärmegewinn aus Faulgasverbrennung	[t/a]	-9			MWh/a	-39		
Transport Schlamm zur Verbrennung	[t/a]	12			MWh/a	34		
Eisensalz (P Fällung)	[t/a]	44						
Kläranlage Strom			[t/a]	957		MWh/a	4.760	
Klärschlammverwertung inkl. Faulgasnutzung			[t/a]	-252		MWh/a	-1.243	
Spülwasser (Trinkwasser)			[t/a]	0,3		MWh/a	0,6	
Direkte CH4 Emissionen Kläranlage			[t/a]	350				
Direkte N2O Emissionen Kläranlage			[t/a]	318				
Infrastruktur								
Spültoiletten			[t/a]	51		MWh/a	515	
Durchschnittsrohr Haus bis Kanal PP			[t/a]	2,7		MWh/a	35	
Durchschnittsrohr Haus bis Kanal Gusseisen			[t/a]	52,4		MWh/a	196	
Durchschnittsrohr Haus bis Kanal PVC			[t/a]	41,7		MWh/a	321	
Kanal Gusseisen			[t/a]	39		MWh/a	144	
Kanal Steinzeug			[t/a]	11		MWh/a	51	
Kanal Erdaushub			[t/a]	1		MWh/a	4	
Kläranlage Edelstahl			[t/a]	4,2		MWh/a	19	
Kläranlage Stahl			[t/a]	10,3		MWh/a	29	
Kläranlage Aluminium			[t/a]	0,3		MWh/a	1	
Kläranlage Beton			[t/a]	26,1		MWh/a	34	
Kläranlage Kupfer			[t/a]	0,4		MWh/a	2	
Kläranlage HDPE			[t/a]	0,4		MWh/a	5	
Kläranlage Glas			[t/a]	0,0		MWh/a	0	
Kläranlage Kalk			[t/a]	0,1		MWh/a	0	
Kläranlage Erdaushub			[t/a]	0,2		MWh/a	1	
Klärschlammverwertung Stahlbeton			[t/a]	37,5		MWh/a	67	
THG/PE aus Betrieb	[t/a]	707		1.373	MWh/a	4.769		3.518
THG/PE aus Betrieb (ohne CH4 und N2O)				705				
THG/PE aus Infrastruktur	[t/a]	0		277	MWh/a	0		1.425
GESAMT THG/PE		707		1.651		4.769		4.943

3.4.3.6 Spezifische vergleichende Analyse des Systems 3

Der Ergebnisvergleich von DWA-Arbeitsbericht und SAmpSONS für das System 3 muss differenzierter erfolgen, da sich relativ große Unterschiede in den THG- und PE-Ergebnissen für die einzelnen Systemkomponenten zeigen (siehe Tabelle 15). Zum Beispiel weist das in SAmpSONS abgebildete GW-Behandlungssystem einen mehr als 11 Mal höheren Energieverbrauch aus als das System im DWA-Arbeitsbericht. Eine wesentliche Begründung könnte in dem aufwendigeren Behandlungsverfahren (z.B. mehrstufige biologische Reinigung, Filtration und UV-Desinfektion) der in SAmpSONS integrierten Technologie liegen, die zu einem höheren Energieverbrauch pro m³ führt. Im Gegensatz dazu weist das in SAmpSONS integrierte Unterdrucksystem einen mehr als 3 Mal geringeren Stromverbrauch auf als das im DWA-Arbeitsbericht berücksichtigte System. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die in SAmpSONS integrierten Verbrauchsdaten auf einer Auswertung von 10 in der Praxis angewendeten Systemen beruhen, so dass die Datenqualität als sehr hoch eingeschätzt wird. In SAmpSONS trägt darüber hinaus der Stromverbrauch der Anaerobbehandlung zu ca. 23 % zum Gesamtstromverbrauch bei. Entsprechende umweltrelevante Verbräuche konnten im DWA-Arbeitsbericht nicht identifiziert werden. Insgesamt ergeben sich in SAmpSONS höhere Stromverbräuche für die berücksichtigten Verfahren, die entsprechend zu höheren THG- und PE-Ergebnissen beitragen. Auf der anderen Seite entstehen durch die Strom- und Wärmeabgewinnung der Faulgasnutzung in SAmpSONS höhere THG- und PE-Gutschriften. Im DWA-Arbeitsbericht werden für das System 3 zusätzlich die Auswirkungen der Nährstoffrückgewinnung betrachtet und in die umweltliche Bewertung mit einbezogen, indem THG- und PE-Gutschriften für vermiedene Düngemittelproduktion berücksichtigt werden. Entsprechende Daten bzw. Verfahrensblöcke waren in SAmpSONS1 noch nicht integriert, [sind nun aber in SAmpSONS2 verfügbar](#).

Insgesamt werden sowohl im DWA-Arbeitsbericht als auch in SAmpSONS für System 3 energiebezogene Gutschriften ausgewiesen, so dass aus beiden Arbeiten die relative umweltliche Vorteilhaftigkeit des Systems 3 gegenüber dem Referenzsystem abgeleitet werden kann. Für eine genauere Bewertung und die Feststellung der wesentlichen Unterschiede müssten die einzelnen Verfahrensblöcke detaillierter untersucht und verglichen werden. Vorhandene technische Verfahrensunterschiede könnten dann in SAmpSONS über modifizierte Eingabewerte (z.B. für Stromverbräuche oder Faulgasausbeuten) abgebildet werden.

Tabelle 15: Vergleich potenzielle Umweltwirkungen (Treibhausgasemissionen und Primärenergiebedarf) System 3 gegenüber Auswertungen in SAMPSONS

	Treibhausgasemissionen								Primärenergiebedarf				Kommentar	
	System 3 KA-Artikel				System 3 SAMPSONS				System 3 KA-Artikel		System 3 KA-Artikel			
	kWh/d		[t/a]		kWh/d		[t/a]		MWh/a		MWh/a			
Stromverbrauch	kWh/d	3.481,1	[t/a]	715	kWh/d	11.486,6	[t/a]	2.360	MWh/a	3.558		MWh/a	11.739	
GW Behandlung	kWh/d	705	[t/a]	145	kWh/d	8.162	[t/a]	1.677	MWh/a	720		MWh/a	8.342	
Unterdruckentwässerung	kWh/d	2.055	[t/a]	422	kWh/d	633	[t/a]	130	MWh/a	2.100		MWh/a	646	
Prozesswasserbehandlung	kWh/d	47	[t/a]	10	kWh/d	0	[t/a]	0	MWh/a	48		MWh/a	0	
Anaerobverfahren	kWh/d	0	[t/a]	0	kWh/d	2.692	[t/a]	553	MWh/a	0		MWh/a	2.751	
Deammonifikation	kWh/d	674	[t/a]	139	kWh/d	0	[t/a]	0	MWh/a	689		MWh/a	0	in SAMPSONS nicht berücksichtigt
Stromgewinn durch Verbrennung Faulgas	kWh/d	-3.197	[t/a]	-657	kWh/d	-5.252	[t/a]	-1.079	MWh/a	-3.267		MWh/a	-5.367	
Wärmegegewinn aus Faulgasverbrennung	kWh/d	-1.077	[t/a]	-99	kWh/d	-10.503	[t/a]	-2.158	MWh/a	-432		MWh/a	-4.217	
Transport zu Landwirtschaft			[t/a]	8			[t/a]		MWh/a	21		MWh/a		in SAMPSONS noch kein Wert vorhanden
Eisensalz (P-Fällung)			[t/a]	8			[t/a]		MWh/a			MWh/a		in SAMPSONS noch kein Wert vorhanden
Düngerersatz P			[t/a]	-84			[t/a]		MWh/a	-74		MWh/a		in SAMPSONS noch kein Wert vorhanden
Düngerersatz N			[t/a]	-266			[t/a]		MWh/a	-465		MWh/a		in SAMPSONS noch kein Wert vorhanden
Spülwasser (Trinkwasser)							[t/a]	0,1				MWh/a	0,4	
Direkte CH4 Emissionen							[t/a]	655						
GW-Behandlung							[t/a]	350						
Anaerobverfahren							[t/a]	305						
BHKW							[t/a]	0,5						
Direkte N2O Emissionen							[t/a]	149						
BHKW							[t/a]	3						
Anaerobverfahren							[t/a]	119,3						
Siedlung							[t/a]	26,5						
Direkte (nicht biogene) CO2 Emissionen							[t/a]	0,6						
Infrastruktur														
Vakuumtoiletten							[t/a]	51				MWh/a	515	
Durchschnittsrohr Haus bis Kanal PP							[t/a]	3				MWh/a	35	
Durchschnittsrohr Haus bis Kanal Gusseisen							[t/a]	52				MWh/a	196	
Durchschnittsrohr Haus bis Kanal PVC							[t/a]	42				MWh/a	320	
Kanal Beton							[t/a]	0				MWh/a	0	
Kanal Steinzeug							[t/a]	11				MWh/a	51	
Kanal Erdaushub							[t/a]	1				MWh/a	4	
Unterdrucksystem Stahl							[t/a]	25				MWh/a	73	
Unterdrucksystem Leitungen/Schacht (HDPE)							[t/a]	29				MWh/a	360	
GW-Behandlung (HDPE)							[t/a]	51				MWh/a	633	
GW-Behandlung (Edelstahl)							[t/a]	9				MWh/a	41	
Anaerobverfahren (Stahl)							[t/a]	51				MWh/a	194	
Anaerobverfahren (Beton)							[t/a]	29				MWh/a	38	
Anaerobverfahren (HDPE)							[t/a]	1,2				MWh/a	15	
BHKW (Stahl)							[t/a]	1,3				MWh/a	6	
BHKW (HDPE)							[t/a]	1,2				MWh/a	15	
THG/PE aus Betrieb			[t/a]	-375			[t/a]	-72	MWh/a	-660			2.155	
THG/PE aus Betrieb (ohne CH4 und N2O)								-876						
THG/PE aus Infrastruktur			[t/a]	0			[t/a]	358	MWh/a	0			2.496	
GESAMT THG/PE				-375				286		-660			4.652	

3.4.3.7 Fazit

Die Ergebnisse des Vergleichs der N- und P-Bilanzen (Kapitel 3.4.3.2 und 3.4.3.3) zeigen ein hohes Maß an Übereinstimmung. Bereits ohne Anpassungen lassen sich die Abweichungen der Werte für alle Systeme plausibel begründen und bewegen sich in einem vertretbaren Ausmaß. Nach Anpassung in SAMPSONS ergeben sich nahezu identische Werte. Anpassungen waren notwendig hinsichtlich der Reinigungsleistungen, der Eliminationswerte und der Verhältnisse zwischen Schlamm und Zentrat.

Im Gegensatz zum DWA-Arbeitsbericht wird in SAMPSONS die Rückführung des Prozesswassers nicht berücksichtigt. Dies ist bedingt durch die Grundannahme in SAMPSONS, dass die Summe der eingetragenen Frachten der Summe der Senken (Gewässer, Schlamm, Gärrückstand) zuzüglich der

gasförmig das System verlassenden Frachten (z.B. N-Elimination in der Kläranlage) bzw. sonstiger Abbauraten entspricht. Im Rahmen der Validierung zeigt sich eine tatsächliche Auswirkung dieser unterschiedlichen Grundannahmen bezüglich der Stickstoff-Frachten im Schlamm (Referenzsystem) und im Zentrat (System 3). Diese Abweichungen führen zu einem zusätzlichen N-Gehalt von ca. + 10 % bzw. ca. + 4 % im DWA-Arbeitsbericht. Dies könnte relevant werden, wenn es um die Rückgewinnungspotenziale geht und müsste in diesem Zusammenhang noch einmal kritisch überprüft werden. Bezüglich P lassen sich keine Auswirkungen auf den Output durch die Rückführung des Prozesswassers feststellen.

Hinsichtlich der N-Bilanz werden zudem Unterschiede durch die unterschiedlichen Verfahren deutlich, insbesondere durch das zusätzliche SBR-Verfahren im DWA-Arbeitsbericht (Referenzsystem) bzw. die Unterschiede bei der GW-Aufbereitung (System 3). Derzeit ist, wie bereits aufgeführt, die Bandbreite an Technologien, die in SAmPSONS zur Verfügung stehen, begrenzt. Im Laufe der Weiterentwicklung und der Verstetigung soll diese jedoch kontinuierlich erweitert und angepasst werden, um so eine möglichst große Zahl an Systemen abbildbar zu machen. Trotzdem wird bereits hier die große Flexibilität des Tools deutlich; insbesondere da den Nutzer*innen die Möglichkeit geboten wird, eigene Werte zu ergänzen und so ein spezifisches System realitätsnah abzubilden und zu visualisieren. Auch der Vorteil der Sankey-Diagramme wurde im Verlauf der Validierung deutlich. Die Visualisierung in dieser Form ermöglicht es, die einzelnen Stoffströme und die Frachten in kurzer Zeit zu erfassen.

Bezüglich der Umweltwirkungen Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen wurde deutlich, dass der Anteil der Infrastrukturaufwendungen entgegen bisheriger Ansätze einen geringen, aber dennoch nicht unwesentlichen Anteil an den gesamten Umweltwirkungen hat. Zudem zeigte der Vergleich mit dem DWA-Arbeitsbericht, dass die Methan- und Lachgasemissionen zu einem signifikanten Teil zu den Treibhausgasemissionen beitragen. Trotz der beschriebenen Unterschiede der in dieser Fallstudie berücksichtigten Verfahrensblöcke bzgl. der THG- und PE-relevanten Daten, liefert SAmPSONS entsprechende Ergebnisse, die mit einer detaillierten Analyse auf Basis einer umfangreichen Datenerhebung vergleichbar sind. Es zeigt sich aber auch, dass die Abbildung komplexer technischer Systeme und insbesondere deren Aneinanderkettung nicht trivial und somit auch eine verlässliche Berechnung der potenziellen Umweltwirkungen mittels SAmPSONS schwierig ist. Die wesentlichen Vorteile der Nutzung von SAmPSONS liegen aber auf der Hand: zum einen können in SAmPSONS integrierte Default-Werte genutzt werden, zum Zweiten können diese Werte bei genauerer Kenntnis angepasst werden und drittens werden die damit verbundenen Auswirkungen auf die Ergebnisse unmittelbar sichtbar.

3.4.4 Fallbeispiel 3: Darstellung der Diclofenac-Reinigungsleistung auf Basis des Arbeitsberichtes (BCE)

Das bereits in Kapitel 3.4.3 dargestellte Fallbeispiel wurde zudem für eine Darstellung der Diclofenac-Reinigungsleistung genutzt. Zwar stehen keine Daten zu Diclofenac aus dem DWA-Arbeitsbericht zur Verfügung, dennoch lässt sich anhand des Vergleichs die Funktionsweise des Parameters „Diclofenac-Reinigungsleistung“ zeigen und grundsätzlich auf Plausibilität überprüfen. Abbildung 37 zeigt das Sankey-Diagramm für Diclofenac im Referenzsystem. Abbildung 38 zeigt das Sankey-Diagramm für Diclofenac in System 3.

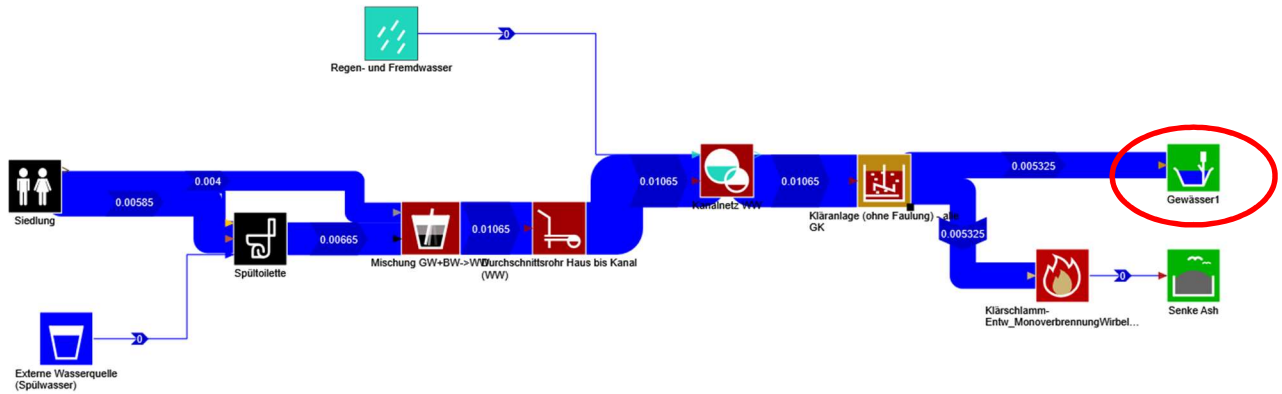


Abbildung 37: Darstellung der Diclofenac-Fracht im Referenzsystem im Sankey-Diagramm [kg/d].

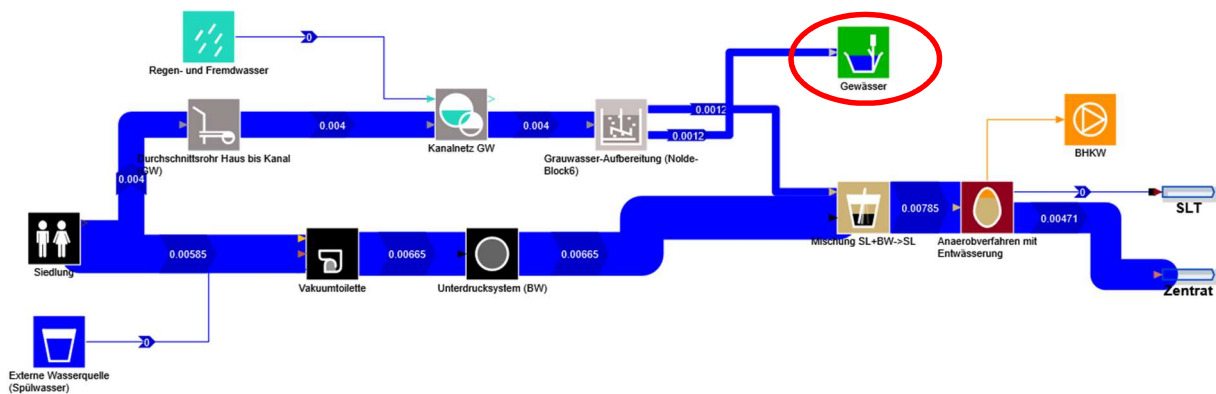


Abbildung 38: Darstellung der Diclofenac-Fracht in System 3 im Sankey-Diagramm [kg/d].

3.4.4.1 Vergleich der Beispiele

Auf Basis von Literaturwerten wurden in den einzelnen Teilströmen Werte für die Diclofenac-Fracht eingefügt. Diese sind von Nutzer*innen änderbar. Insgesamt ergibt sich daraus ein Diclofenac-Eintrag von 0,01065 kg/d (bei 50.000 EW) in beiden Systemen. Im Referenzsystem liegt der Diclofenac-Eintrag ins Gewässer bei 0,005325 kg/d (ca. 50 % der ins System eingetragenen Menge). In System 3 dagegen nur bei 0,0012 kg/d (ca. 11 %). Es zeigt sich hier ein deutlicher Vorteil von ROSS gegenüber dem konventionellen System hinsichtlich des Diclofenac-Eintrags ins Gewässer. Einschränkend ist hier anzumerken, dass die beiden Stoffströme ausgefaulte, entwässerte Schlamm (SLT) und Zentrat (Z) noch einer weiteren Behandlung zugeführt werden müssen. Zudem liegen für die Aufteilung des auf SLT/Z aktuell keine verlässlichen Werte vor. Es ist aber davon auszugehen, dass ein Teil des Diclofenacs auch in den Stoffstrom SLT geht. Davon und von der weiteren Behandlung ist abhängig, ob und in welchem Ausmaß weiteres Diclofenac in die Umwelt gelangt.

3.4.4.2 Fazit zum Vergleich

Bezogen auf den Diclofenac-Eintrag ins Gewässer zeigt sich ein deutlicher Vorteil des ROSS gegenüber dem konventionellen System. Allerdings müssen der entwässerte Schlamm (SLT) und

das Zentrat (Z) noch einer weiteren Behandlung zugeführt werden, wodurch möglicherweise weiteres Diclofenac ins Gewässer oder auf anderem Weg in die Umwelt gelangt. Im Zuge der Integration weiterer Technologien ist geplant, die entsprechenden Technologien ebenfalls in SAmpSONS aufzunehmen, so dass die Auswertung an dieser Stelle vollständig bis zur endgültigen Senke erfolgen kann. Zudem muss die Aufteilung des Diclofenacs auf die Output-Stoffströme SLT und Z einer kritischen Überprüfung unterzogen werden.

Insgesamt stellte sich die Datengrundlage zu Diclofenac in Abwasserbehandlungstechnologien im Laufe des Projektes als sehr lückenhaft heraus. Dadurch wird die Zuverlässigkeit der Ergebnisse eingeschränkt. Dies gilt sowohl hinsichtlich der Reinigungsleistung einzelner Technologien als auch hinsichtlich der Aufteilung der Diclofenac-Frachten auf die Output-Stoffströme. Um hierzu verlässlichere Aussagen treffen zu können sind weitere Untersuchungen notwendig. Auch hier zeigt sich jedoch der Vorteil von SAmpSONS, der sich durch die Flexibilität des Tools ergibt. Da sich die Default-Werte für jede Technologie anpassen lassen, können sie bei einer Verbesserung der Datenlage jederzeit ohne großen Aufwand aktualisiert werden. Dies stellt gerade angesichts der eingeschränkten, teils widersprüchlichen Datenlage zur Diclofenac-Reinigungsleistung für unterschiedliche Reinigungstechnologien eine entscheidende Komponente des Tools dar.

3.4.5 Fallbeispiel 4: Birkenfeld (BCE)

Basis für das Fallbeispiel Birkenfeld/Nahe bildet der Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben 033L044 „Abwasserfreier Umwelt-Campus Birkenfeld: Sondierungsprojekt zur Erarbeitung eines Forschungs- und Entwicklungsantrags zur Umsetzung des Null-Emissions-Konzept des Campus auf dem Bereich Wasser und Abfall“ (im Folgenden „UCB-Bericht“). Im Rahmen des genannten BMBF-Vorhabens wurde ein innovatives Konzept „Abwasserfreier Campus“ in Kooperation mit den Firmen Roediger Vacuum GmbH, areal GmbH, dem Institut IWAR (TU Darmstadt) und dem Institut IfaS (FH Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld) erarbeitet. Dieses dehnt das am Umwelt-Campus bestehende Null-Emission-Konzept (ökologisches Baukonzept, CO₂-neutrale Energie- und Wärmeversorgung, modernste Gebäude- und Anlagentechnik) auf den Bereich Wasser und Abwasser aus. Dafür wurden neben den Wohnheimen, mit 497 Plätzen, auch weitere anfallende Abfall- und Abwasserfrachten berücksichtigt, z.B. aus Bürogebäuden, Waschsalon und Sporthalle sowie der Mensa.

Das Projekt bietet hinsichtlich der Kosten eine umfangreiche Datengrundlage, die sich für einen Vergleich mit den SAmpSONS-Simulationsergebnissen eignet. Darüber hinaus lassen sich anhand der im Projekt erhobenen Werte weitere Daten auf ihre Plausibilität prüfen (z.B. Flächenbedarf der Pflanzenkläranlage, Massenstrombilanzen, etc.). Diese Daten wurden bereits in das Tool eingearbeitet. Im Folgenden wird daher ausschließlich auf den Kostenvergleich eingegangen. Tabelle 16 zeigt den Vergleich der in SAmpSONS verwendeten Technologien mit denen, die im UCB-Bericht beschrieben sind.

Tabelle 16: Darstellung der im UCB-Bericht beschriebenen Technologien und deren Abbildbarkeit in SAmpSONS.

UCB-Bericht	
Komponenten	Abbildbar in SAmpSONS

Mengen und Frachten	ja*1
Umrüsten der Wohnheime	ja
GW-Wärmenutzung	ja*2
Vakuumtechnik	ja
Schwarzwasseraufbereitung (Siebrechenstufe, Rechengut, Entwässerungscontainer, Vorklärung, Scheibentauchkörper mit Nachklärung)	ja*3
Biogas-Fermenter (Nassvergärung, Entwässerungscontainer)	ja
Gasaufbereitung / Gasspeicherung	Nein
Verrohrung innerhalb der Anlage	
Elektrotechnik	Ja*4
Engineering, Konstruktion, Montage, Inbetriebnahme	
Nachgeführte Schwarzwasseraufbereitung über Pflanzenkläranlage	Ja
Grauwasseraufbereitung über Pflanzenkläranlage	Ja

*1 Umrechnung in EWG auf Basis der im Bericht angegebenen Mengen der Stoffströme.

*2 In SAmPSONS nur in Verbindung mit GW-Aufbereitung verfügbar.

*3 In SAmPSONS wurde hierfür auf Block „Kleinkläranlagen“ zurückgegriffen.

*4 Positionen sind in SAmPSONS bereits innerhalb der jeweiligen Technologien berücksichtigt.

3.4.5.1 Vergleich der Investitionskosten

Der Investitionskostenvergleich erfolgte auf Basis der einzelnen Verfahrensblöcke. In SAmPSONS wurde für die Gasverwertung ein BHKW eingebaut. Da die im UCB-Bericht beschriebene Technologie (Gasaufbereitung / Gasspeicherung) in SAmPSONS derzeit nicht zur Verfügung steht, wurden die Kosten für das BHKW nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 39 dargestellt.

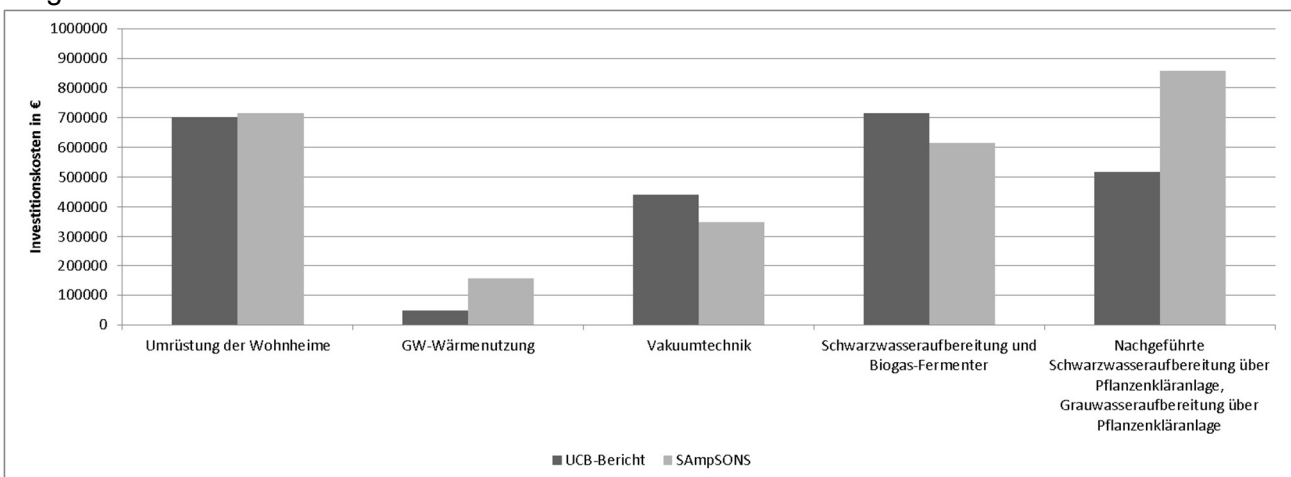


Abbildung 39: Vergleich der Investitionskosten des UCB-Bericht mit den Ergebnissen in SAmPSONS.

Die im UCB-Bericht veranschlagten Investitionskosten liegen insgesamt bei 2.423.403 € im Gegensatz zu 2.694.715 € in SAmPSONS. Damit sind die Kosten in SAmPSONS um etwa 11 %

höher als die im UCB-Bericht angesetzt. Angesichts der großen Unsicherheiten, mit denen Kostenschätzungen generell verbunden sind, ist diese Abweichung bezogen auf die Gesamtkosten – insbesondere im Bereich der Grobplanung - durchaus als vertretbar anzusehen.

Eine Abweichung in den berücksichtigten Technologien ergibt sich bei der Grauwasser (GW)-Wärmenutzung. In SAmpSONS steht diese momentan nur in Verbindung mit GW-Recycling zur Verfügung. Dies führt zu einem deutlichen Unterschied bei den Kosten (UCB-Bericht 48.000 € im Vergleich zu SAmpSONS 156.000 €), der sich jedoch auf die unterschiedlichen Verfahren zurückführen lässt.

Bei den Kosten für die Schwarzwasseraufbereitung und die Nassvergärung zeigen sich im Detail erhebliche Abweichungen. Während im UCB-Bericht für die Schwarzwasseraufbereitung lediglich 155.000 € veranschlagt sind, belaufen sich die Kosten für Kleinkläranlagen auf mehr als 450.000 €. Im Gegensatz dazu sind im UCB-Bericht für den auf die Schwarzwasser-Aufbereitung folgenden Biogas-Fermenter etwa 200.000 € angesetzt. Demgegenüber stehen ca. 140.000 € für die Technologie in SAmpSONS. Zudem kommen im UCB-Bericht weitere 360.000 € hinzu für Verrohrung, Elektrotechnik und Engineering, Konstruktion, Montage und Inbetriebnahme.

Hinsichtlich der Schwarzwasseraufbereitung lässt sich der erhebliche Unterschied durch die Wahl der unterschiedlichen Technologien begründen. Für die anfallende Wassermenge würden insgesamt 58 Kleinkläranlagen benötigt. Durch die volle Anrechnung der Anzahl an Kleinkläranlagen kommt es zu einer erheblichen Kostenüberschätzung. Hier müssten die entsprechenden Kostenparameter stark angepasst bzw. das Tool um eine entsprechende Technologie erweitert werden.

Bezogen auf die Anaerobvergärung werden die Kosten in SAmpSONS unterschätzt. Ein Grund hierfür ist, dass neben dem im UCB-Bericht anfallenden Mengen an Schwarzwasser und Bioabfall aus den Wohnheimen auch weitere Inputströme berücksichtigt werden (z.B. Speiseabfälle aus der Mensa). Diese zusätzlichen Inputströme werden derzeit in SAmpSONS nicht berücksichtigt. Da die Kosten in SAmpSONS auf Basis der EWG berechnet werden bedingt dies eine Unterschätzung der Kosten.

Hinzu kommt, dass aus dem UCB-Bericht nicht hervorgeht, welcher Technologie die zusätzlichen Kosten (Verrohrung innerhalb der Anlage, Elektrotechnik, Engineering, Konstruktion, Montage, Inbetriebnahme) zuzurechnen sind. Diese sind in den jeweiligen SAmpSONS-Blöcken bereits enthalten. Werden sie beispielweise zu 100 % der Anaerobvergärung zugerechnet, betragen die Kosten für die Schwarzwasseraufbereitung mittels Kleinkläranlagen das Dreifache der Kosten, die für die Schwarzwasseraufbereitung im UCB-Bericht angesetzt werden. Dagegen betragen die Kosten in diesem Fall für den Biogas-Fermenter nur 25 % derer, die im UCB-Bericht angesetzt werden. Abbildung 40 zeigt das Verhältnis der Kosten in SAmpSONS in Abhängigkeit von der Zurechnung der zusätzlichen Kosten.

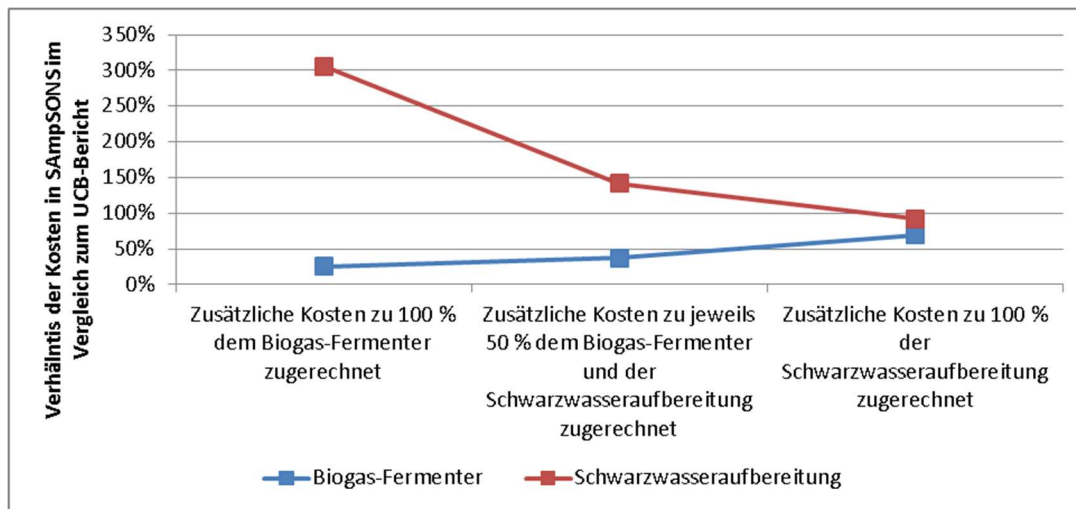


Abbildung 40: Verhältnis der Kosten in SAmpSONS im Vergleich zu den Kosten im UCB-Bericht für den Biogas-Fermenter und die Schwarzwasseraufbereitung in Abhängigkeit von der Zurechnung der zusätzlichen Kosten.

Eine erhebliche Abweichung wird zudem bei der GW- bzw. SW-Behandlung mittels Pflanzenkläranlage deutlich (DBU-Bericht 517.000,00 €; SAmpSONS ca. 850.000 €). Die Kosten in SAmpSONS liegen um ca. 60 % über denen im UCB-Bericht. Dies lässt sich auf Basis der aktuellen Datenlage nicht abschließend erklären und muss näher untersucht werden. Ein möglicher Grund könnte sein, dass die Kosten in SAmpSONS für kleinere Pflanzenkläranlagen gelten und hier eine lineare Skalierung nach oben zu einer Überschätzung der Kosten führt, da keine Skaleneffekte berücksichtigt werden.

3.4.5.2 Fazit

Im UCB-Bericht wurden die einzelnen Komponenten auf den konkreten Fall spezifisch von den jeweiligen Fachfirmen ausgelegt. In SAmpSONS handelt es sich dagegen um eine grobe Abschätzung, ohne detaillierte Kenntnisse der spezifischen Gegebenheiten. Auch wenn die Gesamtkosten als hinreichend genau eingeschätzt werden können, zeigen sich im Detail große Abweichungen der Kostenpositionen der einzelnen Technologien.

Hier wird ein grundsätzliches Problem deutlich wenn es darum geht, allgemeingültige Kostenwerte in einem Analyse-/Simulationstool zu hinterlegen. Generell sind Kostenabschätzungen mit großen Unsicherheiten verbunden, insbesondere dann, wenn sie nicht für einen spezifischen Fall ausgelegt sind. Auf diesen Sachverhalt wird in verschiedenen Veröffentlichungen hingewiesen. Diese Problematik ließ sich auch in SAmpSONS nicht lösen.

Verschiedene Faktoren konnten identifiziert werden, die zu einer Verzerrung der Kosten führen. Die Kostenwerte wurden meist für spezifische Beispiele bestimmter Technologien hinterlegt. Diese sind nicht notwendigerweise repräsentativ für unterschiedliche Anwendungsfälle. Beispielsweise führt das Verfahren der linearen Skalierung von Kostenwerten in vielen Steckbriefen zu Abweichungen, da dort keine Skaleneffekte berücksichtigt wurden. Auch gibt es für eine Technologie eine große Bandbreite an Ausgestaltungsmöglichkeiten, die sich erheblich auf die Kosten auswirken kann. Hinzu kommen regionale Unterschiede und solche im Zeitverlauf. Auch durch die Bezugsgröße der Kostenwerte (in der Regel EWG) ergeben sich Verzerrungen der Kosten, insbesondere dann, wenn

nur ein Teilstrom der Technologie zugeführt wird, dies wird beispielsweise im Anaeroblock deutlich. Die Nutzer*innen müssen hier sehr sorgfältig darauf achten, die Default-Werte dementsprechend anzupassen.

Auch hier gilt, dass mit einer Verbesserung der Datengrundlage auch eine Verbesserung der Ergebnisse erreicht werden kann, da die Default-Werte anpassbar sind. Die bestehenden Default-Werte geben lediglich eine sehr grobe Orientierung. Die Nutzer*innen müssen diese Default-Werte kritisch hinterfragen und gegebenenfalls anpassen. Aber auch unabhängig von einzelnen Nutzer*innen ist es ein Ziel des SAmPSONS-Projektes, die Datengrundlage systematisch zu verbessern um immer genauere Default-Werte zu erhalten, z.B. durch die Möglichkeit, Technologieanbieter*innen die Option zu bieten, Daten für das Tool bereit zu stellen, weitere Fallbeispiele und den Test durch Nutzer*innen. Ziel ist es hier, in einen kontinuierlichen Austausch mit den verschiedenen Gruppen zu treten.

3.4.6 Fallbeispiel 5: Vergleich Verfahren 4. Reinigungsstufe (BCE)

3.4.6.1 Aufbau des Fallbeispiels

Die Basis für den Vergleich der in SAmPSONS2 implementierten 4. Reinigungsstufen bildet das Referenzsystem Wohlsborn (siehe Kapitel 3.4.1). Es besteht im Wesentlichen aus einer Siedlung, der Sammlung anfallender Abwasserströme mittels Spültoilette und Ableitung in eine Kläranlage ohne Faulung ohne Betrachtung des durch Niederschlagswasser zusätzlich anfallenden Abwasservolumens. Einzige Anpassung gegenüber dem Fallbeispiel ist, dass der entstehende Klärschlamm im aggregierten Block der Faulung, Entwässerung, Trocknung und Monoverbrennung behandelt wird. Die Klärschlammmasche endet in der dafür vorgesehenen Senke (Deponie), der Kläranlagenüberlauf führt ohne weitere Behandlung in den Vorfluter (Senke Gewässer).

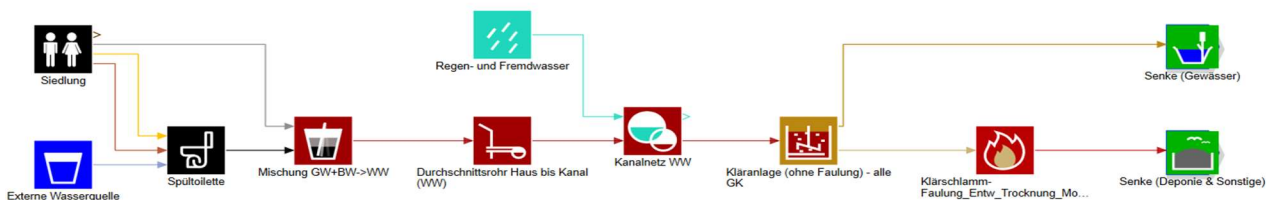


Abbildung 41 Referenzsystem für Fallbeispiele der 4. Reinigungsstufe

Auf diesem System aufbauend wurden drei Verfahren der 4. Reinigungsstufe zwischen Kläranlagen-Überlauf und Gewässer geschaltet, namentlich eine Aktivkohlefilterung (siehe Abbildung 42), eine technische Anlage zur Ozonierung und eine Anlage zur UV-Behandlung der gereinigten Abwässer. Die dafür zugrundeliegenden Daten sind in den Daten-Steckbriefen im Anhang dieses Berichts nachzulesen. Als wichtigste Eckdaten sei die Größenordnung der Dosierungen genannt, welche im mittleren Bereich gewählt wurden und sich bei der Anwendung von Pulver-Aktivkohle auf 10g pro m³ Abwasser, bei der Ozonierung auf 10mg Ozon pro Liter Abwasser und bei der UV-Behandlung auf eine Bestrahlungsstärke von 400 J/m² belaufen. Die Simulationen wurden für eine Systemgröße von 100.000 EW-Werten durchgeführt und anschließend hinsichtlich der Reinigungsleistungen der organischen Spurenstoffe, der Verfahrenskosten und der mit der Verfahrensanwendung zusammenhängenden Umweltwirkungen ausgewertet.

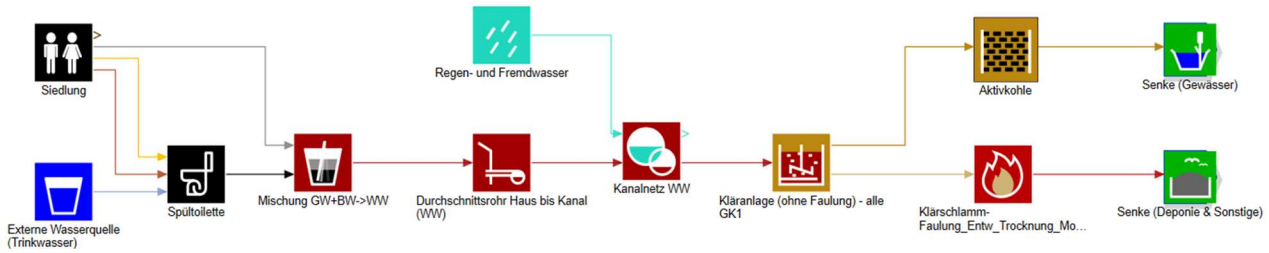


Abbildung 42 Fallbeispiel Referenzsystem mit 4. Reinigungsstufe Aktivkohlefiltration

3.4.6.2 Ergebnisse Vergleich 4. Reinigungsstufe

Für die Implementierung organischer Spurenstoffe wurden die Indikatorsubstanzen Diclofenac, Metoprolol, Sulfamethoxazol, Benzotriazol und Iomeprol gewählt (siehe auch Kapitel 3.2.2.2). Der Gesamteintrag an organischen Spurenstoffen in das Referenzsystem, resultierend aus den Schwarz- und Grauwasserströmen der Siedlung, ist basierend auf den jeweiligen default-Werten der Einzelsubstanzen für die Simulation von 100.000 EW-Werten mit insgesamt 13.109 kg/a in die Modellbetrachtung eingegangen. Die Reinigungsleistung des modellierten Referenzsystems, einer Kläranlage der Größenklasse 4, führt zu einem Austrag an organischen Spurenstoffen in das Gewässer von insgesamt 6.117 kg/a, was über alle betrachteten organischen Spurenstoffe hinweg einer durchschnittlichen Reinigungsleistung von rund 53,3% entspricht. Dabei unterscheiden sich die Reinigungsleistungen für die unterschiedlichen Indikatorsubstanzen maßgeblich voneinander. So wurden als default-Werte für die Reinigungsleistung einer konventionellen Kläranlage ohne 4. Reinigungsstufe Reinigungsleistungen zwischen 88% (Benzotriazol) und 0% (Iomeprol) angesetzt. Je nach technischer Konfiguration der 4. Reinigungsstufen, dem jeweiligem Betriebsmodus und Aufwandmenge und nicht zuletzt der spezifischen chemischen Verbindung, die betrachtet wird, erreichen die unterschiedlichen Verfahren der 4. Reinigungsstufe teils stark voneinander abweichende Ergebnisse für die Effektivität ihrer jeweiligen Eliminations- und Reinigungsleistungen. Unter den getroffenen Annahmen und Randbedingungen konnte eine Gesamt-Reinigungsleistung der simulierten 4. Reinigungsstufen von 58,9% (UV-Behandlung), 90,3% (Aktivkohlefiltration) bzw. 94,7% (Ozonierung) ermittelt werden, die sich aus den Massenströmen und Reinigungsleistungen für die Einzelsubstanzen ergibt (siehe Abbildung 43 und Abbildung 44).

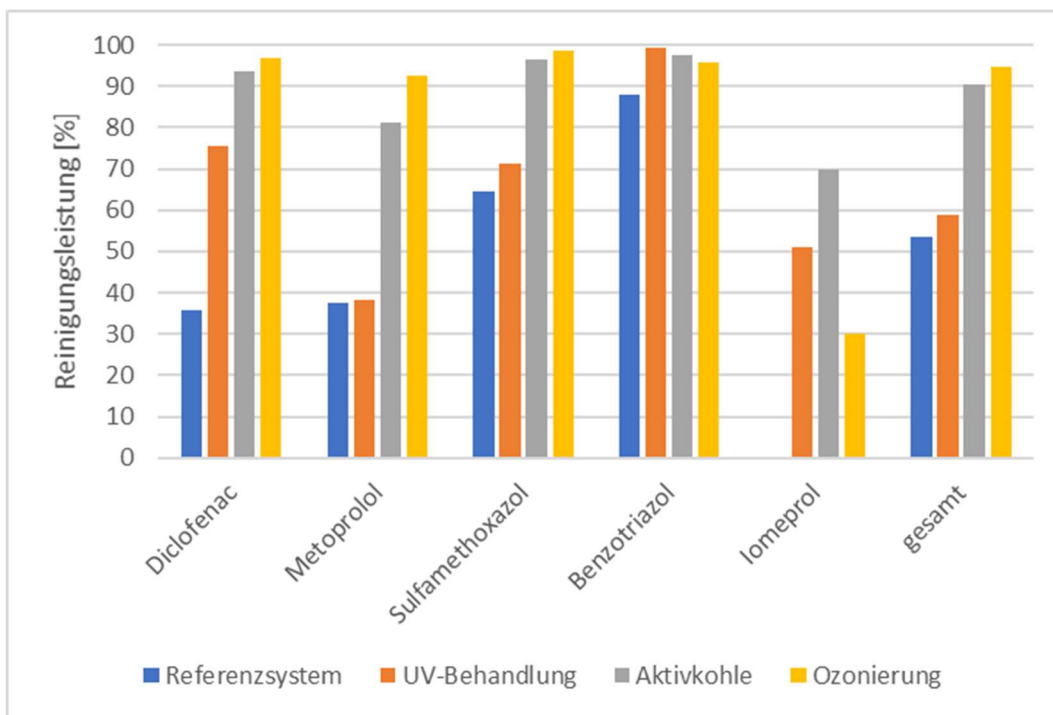


Abbildung 43: Reinigungsleistungen der 4. Reinigungsstufen für fünf organische Spurenstoffe

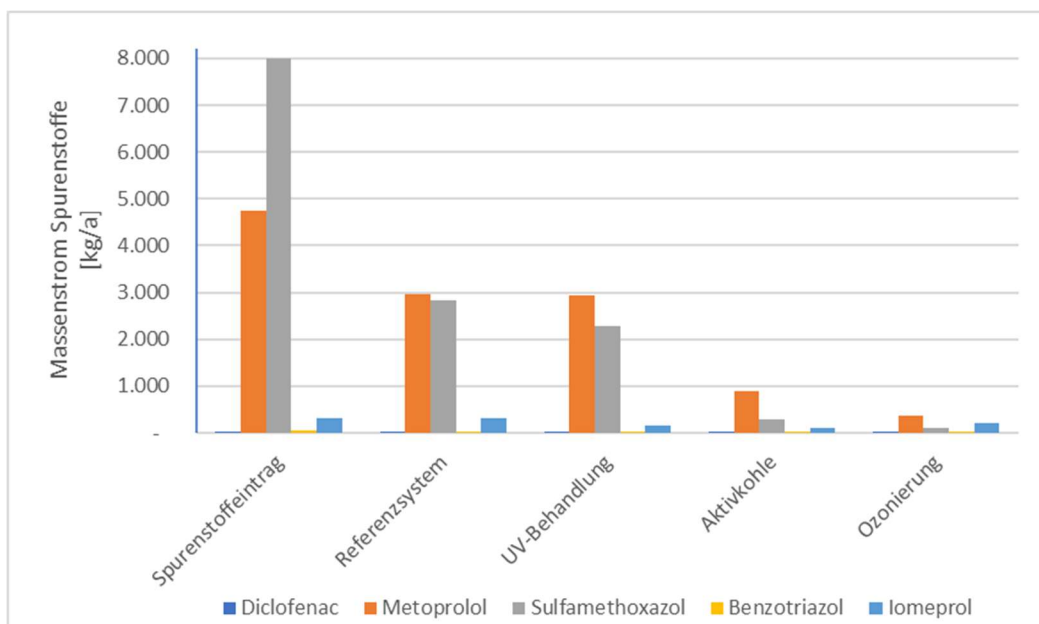


Abbildung 44: Spurenstoffeintrag und -austrag per Technologie der 4. Reinigungsstufen, modelliert in SAMPSONS2

Die Investitions- und Betriebskosten (CAPEX und OPEX) der implementierten Verfahren wurden bezogen auf EW-Wert und Jahr errechnet und sind in Abbildung 45 nach ihrem Anfall bei Errichtung (CAPEX) bzw. Betrieb (OPEX) der Anlagen dargestellt. Die UV-Behandlung verursacht laut den Simulationsergebnissen mit 5,48EUR pro EW und Jahr im Vergleich weniger zusätzliche Kosten als für die Ozonierung oder Aktivkohlefilterung der Abwässer anfallen würden (8,83 EUR bzw. 9,00EUR pro EW und Jahr).

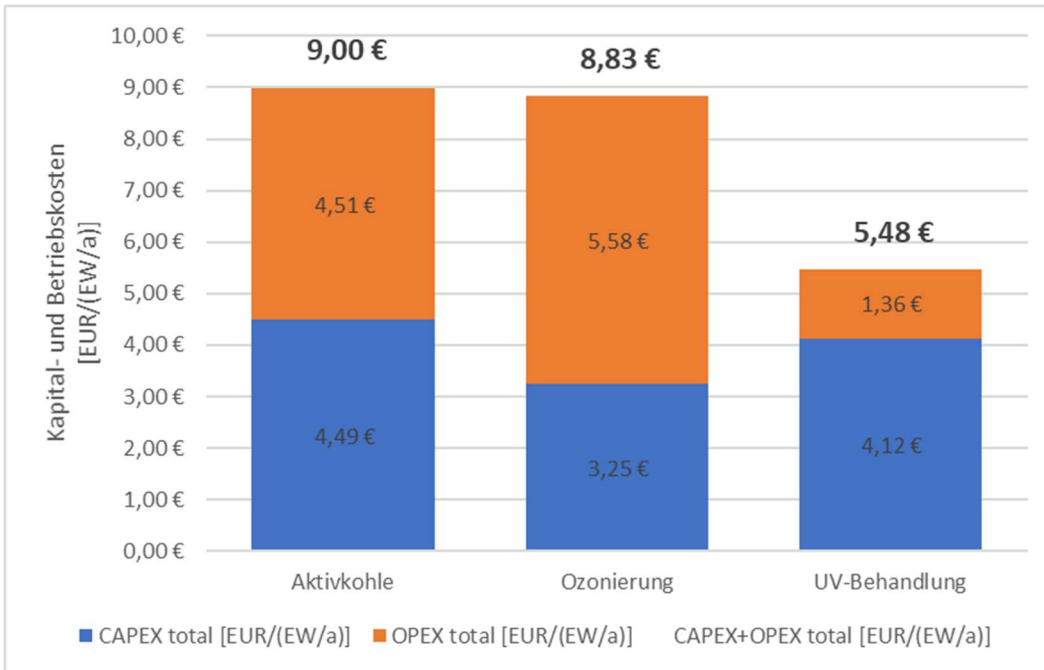


Abbildung 45 Kapital- und Betriebskosten der 4. Reinigungsstufen, modelliert in SAmPSONS2

Für die Darstellung der Ergebnisse der Umweltperformance wurden die simulierten Umweltwirkungen der jeweils durch eine 4. Reinigungsstufe ertüchtigten Kläranlagen vom alleine durch die Kläranlage und Abwasserreinigung selbst ausgelösten Umweltwirkungen subtrahiert, um die 4. Reinigungsstufen untereinander besser vergleichen zu können.

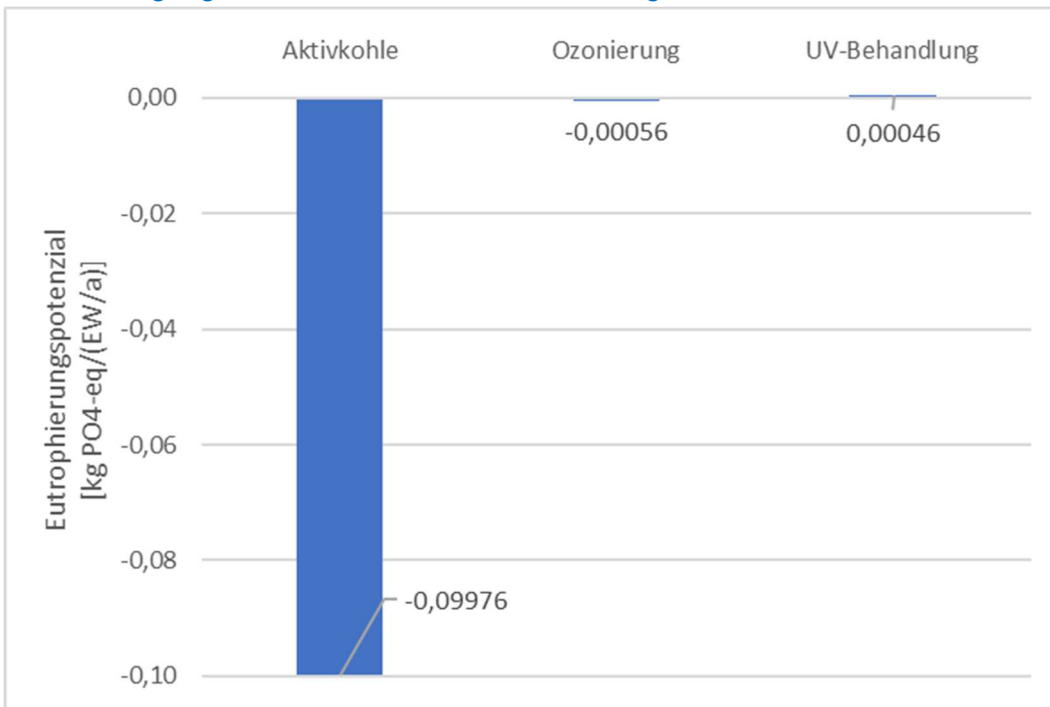


Abbildung 46 Eutrophierungspotenzial der 4. Reinigungsstufen, simuliert in SAmPSONS2

Das durch den Einsatz von Aktivkohle um ca. 0,1 kg PO₄-eq. pro EW-Wert und Jahr reduzierte Eutrophierungspotenzial resultiert im Wesentlichen aus dem Entzug von Nährstoffen und oxidierbaren Bestandteilen aus dem vorgereinigten Abwasser durch die aktive Oberfläche der

eingesetzten Kohlen. Die in Abbildung 46 dargestellte Reduzierung beim Einsatz von Ozon beläuft sich auf rund 0,6 g PO₄-eq pro EW-Wert und Jahr und ist in der Verminderung des chemischen Sauerstoffbedarfs begründet, der auf der oxidativen Wirkung von Ozon basiert. Durch den Einsatz einer UV-Behandlung konnte ein zusätzliches Eutrophierungspotenzial von rund 0,5 g PO₄-eq pro EW-Wert und Jahr ermittelt werden, was hauptsächlich durch den Materialersatz während des Betriebs zu erklären ist, also den regelmäßigen Ersatz der UV-Strahler und die dafür notwendigen Ressourcen.

Das mit 6,28 kg CO₂-Äquivalent pro Einwohner*in und Jahr durch den Einsatz einer Aktivkohlefilterung zusätzlich anfallende Treibhausgaspotenzial liegt nahe an den für die Ozonierung simulierten 6,18 kg CO₂-Äquivalent. Dies setzt sich hauptsächlich aus dem Energieaufwand für die Bereitstellung der Betriebsmittel zusammen, im Falle der Aktivkohlefilterung also der Herstellung der Pulver-Aktivkohle selbst und den dafür eingesetzten Hilfsstoffen (Baumaterialien und Primärenergie), sowie im Falle der Ozonierung für die Bereitstellung und Lagerung des Flüssigsauerstoffs zur Ozonerzeugung und für die Ozonerzeugung selbst (Stahl, Zement und Primärenergie). Die bei der UV-Behandlung nötigen Betriebsmittel abseits der elektrischen Energie zum Betrieb der Strahler sind im Modell lediglich in den für den regelmäßigen Ersatz des UV-Leuchtmittels angesetzten Quarzglas inbegriffen, was einen vergleichsweise geringen Anteil ausmacht und das um etwa 2/3 niedrigere Treibhausgaspotenzial der UV-Behandlung (1,98 kg CO₂-Äquivalent pro EW und Jahr) im Vergleich zur Aktivkohle- und Ozonbehandlung der Abwässer (6,28 bzw. 6,18 kg CO₂-Äquivalent pro EW und Jahr) erklärt.

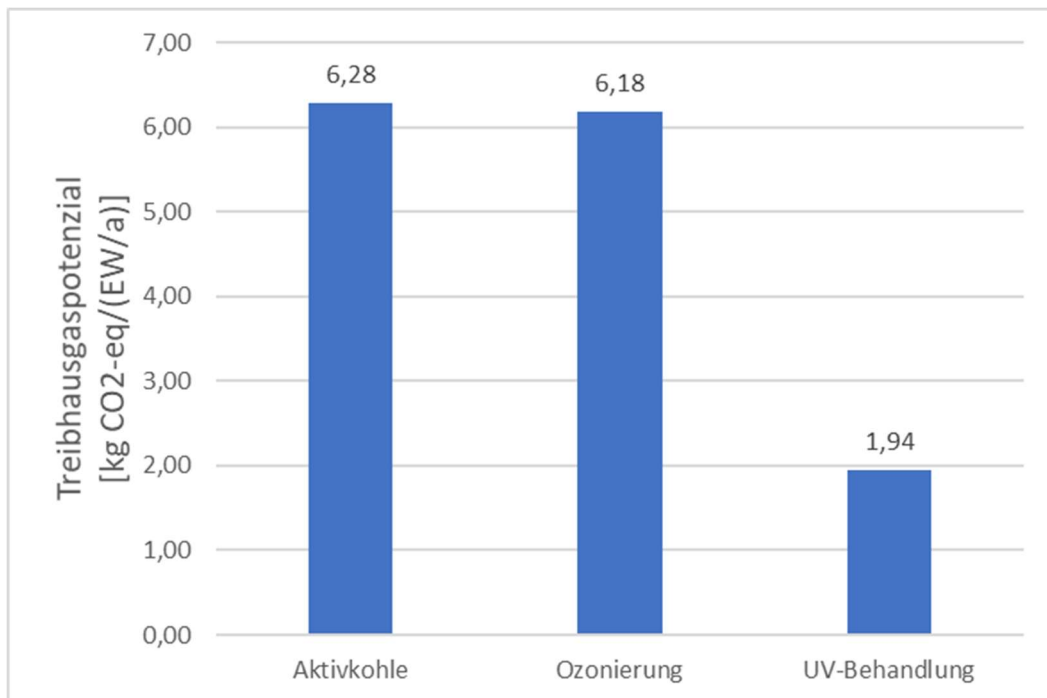


Abbildung 47 Treibhausgaspotenzial der 4. Reinigungsstufen, simuliert in SAmPSONS2

Der Primärenergiebedarf ist in seiner Entstehung eng gekoppelt mit dem bereits dargestellten Treibhausgaspotenzial. Er liegt mit rund 126 bzw. 112 MJ pro Einwohner*in und Jahr im Falle der Aktivkohlefiltration bzw. Ozonierung etwa drei bis viermal so hoch wie der der UV-Behandlung (rund 35 MJ/EW-Wert und Jahr), siehe Abbildung 48.

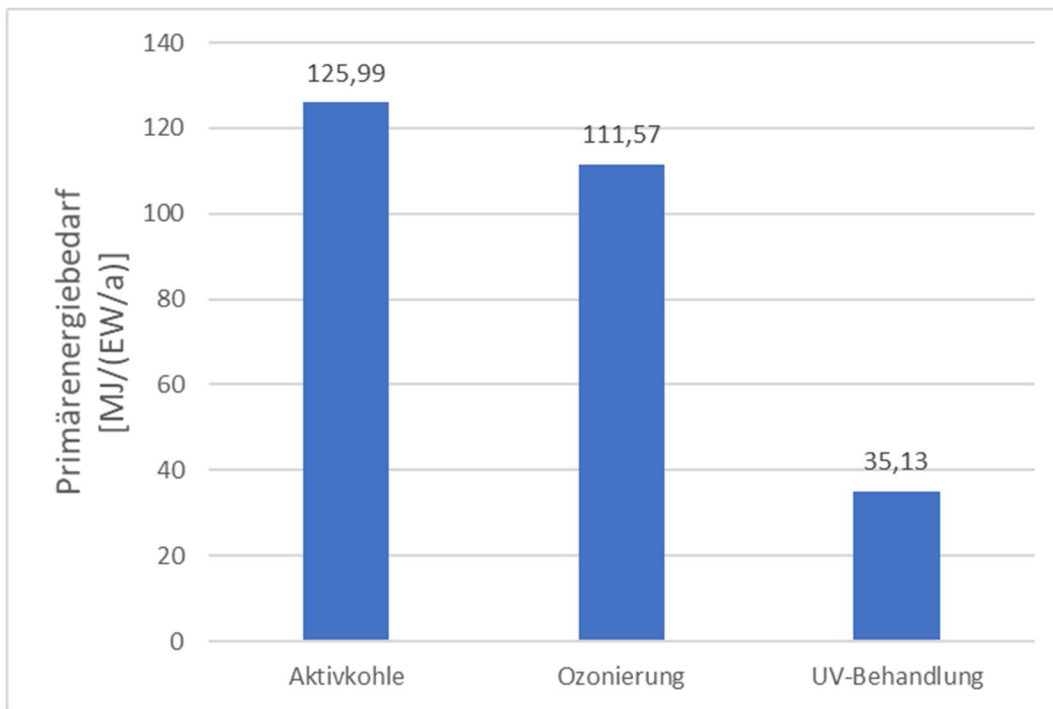


Abbildung 48 Primärenergiebedarf der 4. Reinigungsstufen, simuliert in SAmpSONS2

Die in SAmpSONS2 implementierten Verfahren der 4. Reinigungsstufe stimmen mit den angesetzten default-Werten gut mit den in der Literatur verfügbaren Daten zu Kostenschätzungen überein. So kommt Mezger et al. (2014) zu dem Ergebnis, dass sich die Kosten für eine 4. Reinigungsstufe ohne Zuwendungen auf Größenordnungen zwischen 2,47 € pro EW und Jahr und 12,60 € pro EW und Jahr belaufen.

Mit zusätzlich rund 6kg CO₂-Äquivalent pro EW-Wert und Jahr im Falle der Implementierung einer Ozonierung oder Aktivkohlefilterung liegt das Treibhausgaspotenzial im Vergleich zu den insgesamt für die Abwasserreinigung ermittelten Emissionen (rund 96kg pro EW-Wert und Jahr) bei einem Anteil von etwa 6,25%.

Die Ergebnisse des Fallbeispiels zeigen, ein Vergleich verschiedener Reinigungsstufen untereinander ist mit SAmpSONS2 ohne großen Aufwand möglich und liefert plausible Ergebnisse, dies gilt auch für den in der Literatur und Praxis oft anzutreffenden Fall einer Kombination von Verfahren (z.B. Ozonierung und Pulveraktivkohle oder UV-Behandlung und Pulveraktivkohle). Insgesamt stimmen die erhaltenen Simulationsergebnisse optimistisch und erlauben eine fundierte Grobplanung und Abschätzung der Kosten und Umweltwirkungen verschiedener Optionen von Verfahren für die Ertüchtigung von Kläranlagen mit einer 4. Reinigungsstufe. Nutzer*innen haben jederzeit die Möglichkeit im Falle einer aktuelleren und/oder verbesserten Datenlage die hinterlegten Werte entsprechend anzupassen und exaktere Simulationsergebnisse zu erhalten.

3.4.7 Fallbeispiel 6: Klärschlammverwertung disaggregierte vs. aggregierte Blöcke (TUB)

In dem Fallbeispiel 3 in SAmpSONS1 wurden die Prozesse Eindickung, Entwässerung und Trocknung von Klärschlamm im Block der anaeroben Vergärung aggregiert. In SAmpSONS2 sind diese Prozesse disaggregiert. Diese Disaggregation der Verfahrensblöcke bietet die Möglichkeit, mögliche Schlammentsorgungsszenarien situationspezifischer zu modellieren. Ferner kann der Konzentratstrom, der bei jedem dieser Prozesse entsteht, in ein ausgewähltes

Abwasserbehandlungsverfahren zurückgeführt werden, um eine genauere und realitätsnähere Simulation zu ermöglichen.

Die verschiedenen Schlammarten spielen eine wichtige Rolle für den Energiebedarf und das Stoffstromverhalten, was ein wichtiger Bestandteil für die Entscheidungsfindung im Prozess der Schlammbehandlung ist. In dieser Disaggregation können Anwender*innen zwischen eingedicktem, entwässertem und getrocknetem Schlamm unterscheiden.

Der hochkonzentrierte Strom wird zur weiteren Behandlung in den Abwasserbehandlungsprozess zurückgeführt oder einem eigenständigen Behandlungsverfahren (z.B. SBR) zugeführt. Die Simulation dieses Konzentratstromes führt zu einer genaueren Stoffstromanalyse und Energieanalyse.

Um die Funktion und Ergebnisse von disaggregierten Blöcken mit dem aggregierten Block gegenüber zu stellen, wird die Fallstudie 3 von Sampsons1 untersucht, um den Unterschied der Ergebnisse zu zeigen.

Abbildung 49 zeigt die Simulation von zwei Szenarien, die auf dem Referenzszenario des KA-Artikels für 50.000 PE (DWA, KA) basiert.

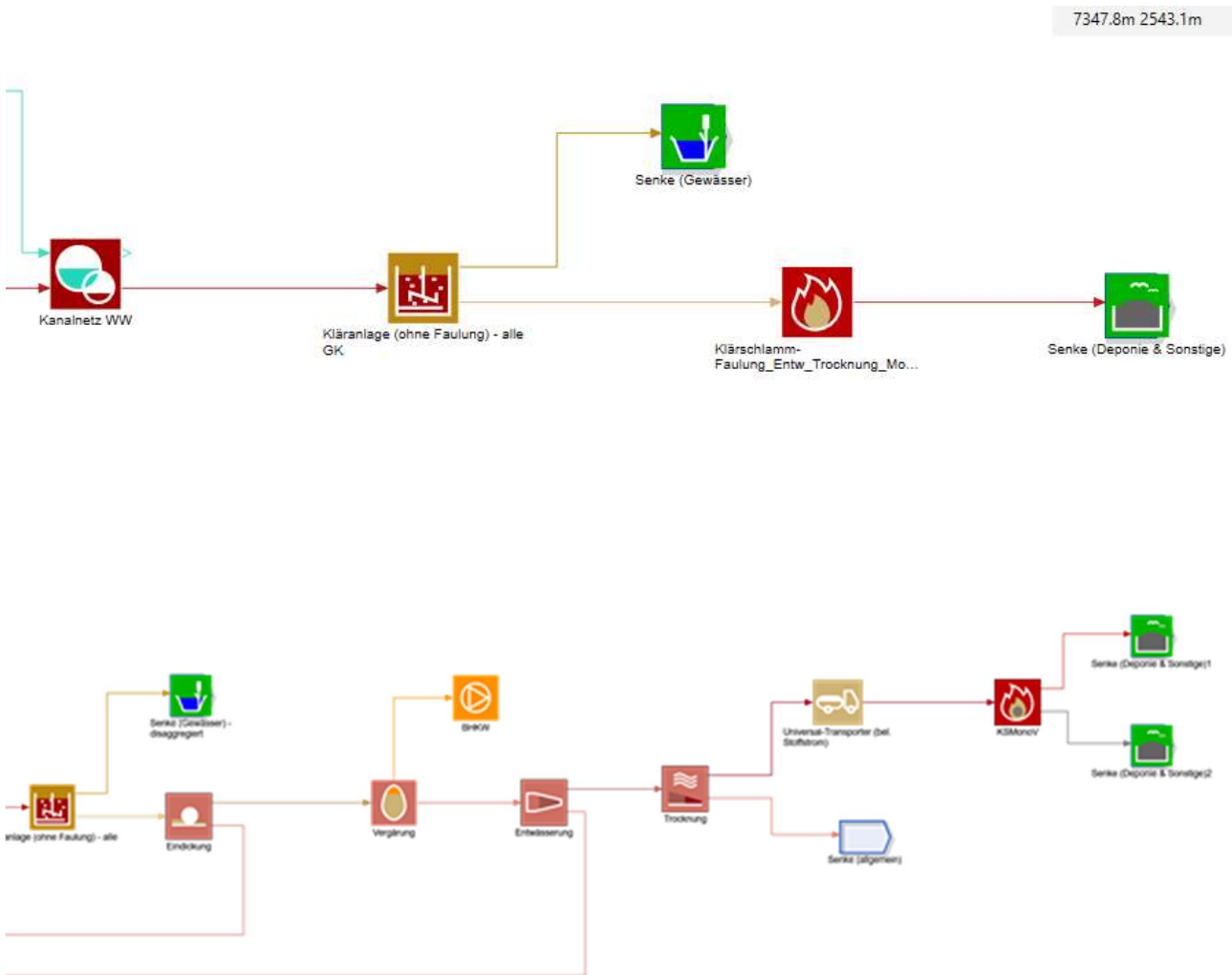


Abbildung 49: Aggregiertes und disaggregiertes Szenario (bis zur Kläranlage sind Szenarien gleich)

Nach der Simulation wurden die Ergebnisse der einzelnen Szenarien mit den im DWA-KA 1.6-Artikel berichteten Ergebnissen verglichen. Der Vergleich beinhaltet:

- Zulauf im gesamten System
- Abfluss in die Gewässer und in den Klärschlamm
- Energiebedarf und Rückgewinnung
- Primärenergie- und CO₂-Emissionsbilanz

Tabelle 17 zeigt die wichtigsten Parameter, die in jedem Szenario angenommen werden, Tabelle 18 zeigt die Ergebnisse des Abflusses in die Wasserressourcen nach dem Abwasserreinigungsprozess.

Tabelle 19 beschreibt die Schlammspezifikation nach dem Trocknungsprozess. Da in SAMPSONS1 dieser Prozess in einem Monoverbrennungsblock aggregiert wurde und der Output Asche war, gab es keine Möglichkeit, die Qualität des Schlammes zu berücksichtigen.

Tabelle 17: Die wesentlichen Parameter des Zuflusses in jedem Szenario

Zulauf	Einheit	Referenz	Aggregiertes Szenario	Differenz Szenarien
Einwohner	[E]	50000		
QS ⁶ = QH ⁷ + QF ⁸	[m ³ /d]	7930	7930	0
BSB5	[kg/d]	1003,75	N.A*	
TS	[kg/d]	3700	N.A	
Nges	[kg/d]	635	635	0
Pges	[kg/d]	100	100	0
	Einheit	Referenz	Disaggregiertes Szenario	Differenz Szenarien
Einwohner	[E]	50000		
QS = QH + QF	[m ³ /d]	7930	7930	0
BSB5	[kg/d]	1003,75	N.A	
TS	[kg/d]	3700	3700	
Nges	[kg/d]	635	635	0
Pges	[kg/d]	100	100	0

* Da ein aggregierter Block verwendet wurde, gibt es keine Möglichkeit, Ergebnisse anzuzeigen

Tabelle 18: Ablauf in Gewässer in jedem Szenario

Ablauf in Gewässer	Einheit	Referenz	Aggregiertes Szenario	Differenz Szenarien
QS = QH + QF	[m ³ /d]	7925,8	7383,0	542,8
BSB5	[kg/d]	15,5	N.A*	15,5

⁶ QS = Schmutzwasserabfluss

⁷ QH = häusliches Abwasser

⁸ QF = Fremdwasserabfluss

TS	[kg/d]	85,1	N.A	
Nges	[kg/d]	110,6	102,9	7,7
Pges	[kg/d]	6,8	6,1	0,7
Ablauf in Gewässer	Einheit	Referenz	Disaggregiertes Szenario	Differenz Szenarien
QS = QH + QF	[m ³ /d]	7925,8	7920,0	5,8
BSB5	[kg/d]	15,5		15,5
TS	[kg/d]	85,1	85,4	-0,3
Nges	[kg/d]	110,6	109,7	0,9
Pges	[kg/d]	6,8	6,8	0,0

Tabelle 19: Abfluss im Schlamm in jedem Szenario

Schlamm nach Trocknung	Einheit	Referenz	Aggregiertes Szenario	Differenz Szenarien
Menge	[m ³ /d]	4,02	N.A*	N.A
TS-Fracht	[kg/d]	3213,00	N.A	N.A
oTS-Fracht	[kg/d]	1993,00	N.A	N.A
Nges	[kg/d]	90,90	N.A	N.A
Pges	[kg/d]	94,40	N.A	N.A
Schlamm nach Trocknung	Einheit	Referenz	Disaggregiertes Szenario	Differenz Szenarien
Menge	[m ³ /d]	4,02	4,25	-0,23
TS-Fracht	[kg/d]	3213,00	3088,00	125,00
oTS-Fracht	[kg/d]	1993,00	1721,00	272,00
Nges	[kg/d]	90,90	86,01	4,89
Pges	[kg/d]	94,40	93,16	1,24

* Da ein aggregierter Block verwendet wurde, gibt es keine Möglichkeit, Ergebnisse anzuzeigen

In der Tabelle 20 wird gezeigt, dass das Modell mit dem aggregierten Verfahrensblock den Energiebedarf genau berechnen kann, wenn die gleiche Menge an Energiebedarf in das Modell eingegeben wird, basierend auf kWh/(pe.a). In diesem Fall war der Gesamtenergiebedarf der Abwasserbehandlung aus dem DWA-Artikel verfügbar und durch Eingabe dieses Wertes wird die genaue Zahl berechnet.

Im Falle der disaggregierten Blöcke wird der Energiebedarf auf Basis der benötigten Energie in jedem Prozess berechnet. Obwohl auch in diesem Szenario die gleichen Ergebnisse zu erwarten sind, kommt der bestehende Unterschied in der Energieberechnung vom Energiebedarf für die Konzentratbehandlung im Referenzszenario.

Da im Referenzszenario eine getrennte SBR-Anlage für die Konzentratbehandlung betrachtet wird, die den Energiebedarf auf Basis der Stickstoffelimination berechnet, und dieser Prozess in SAmpSONS nicht simuliert wird, ergibt sich eine Abweichung.

In SAmpSONS2 ist der Energiebedarf für die Abwasserbehandlung inklusive Belüftung, Entwässerung und Trocknung. Obwohl die Belüftung zur zusätzlichen Elimination für den Strom, der

zum Einlass der Abwasserbehandlung zurückkehrt, berücksichtigt wird, ist sie nicht mit dem Referenzszenario kompatibel.

Im KA-Artikel wird der thermische Energiebedarf nur für den Faulbehälter berücksichtigt, und es wird angenommen, dass der erforderliche Eintrag für die Trocknung mit der erzeugten Energie aus dem Monoverbrennungsprozess ausgeglichen wird.

Tabelle 20: Energieaufwand in jedem Szenario

Energieaufwand	Einheit	Referenz	Aggregiertes Szenario	Differenz Szenarien
Abwasserbehandlung				
Input Strom	[kWh/d]	4.672,0	4.657,5	14,0
Input Wärme	[kWh/d]			
Schlammbehandlung				
Input Wärme	[kWh/d]	2.608,0	N.A	N.A
Energieaufwand	Einheit	Referenz	Disaggregiertes Szenario	Differenz Szenarien
Abwasserbehandlung				
Input Strom	[kWh/d]	4.672,0	4.585,6	86,0
Input Wärme	[kWh/d]			
Schlammbehandlung				
Input Wärme	[kWh/d]	2.608,0	7.160,3	-4.552,0

Tabelle 21 zeigt die Ergebnisse für die Energie- und CO₂-Emissionsbilanz. Ein signifikanterer Unterschied wird durch unterschiedliche angewandte Faktoren für den Primärenergiebedarf und die CO₂-Emissionen ausgelöst.

Tabelle 22 zeigt die in SAmpSONS und in DWA-KA verwendeten Parameter, die zu diesem Unterschied führen.

Tabelle 21: Energie- und CO₂-Bilanz in jedem Szenario

	Einheit	Referenz	Aggregiertes Szenario	Differenz Szenarien
Summe Energie-Bilanz *	[MWh/a]	3350,91	4233,94	-883,03
Summe CO₂-Bilanz	[t/a]	724,50	1756,88	-1032,39
	Einheit	Referenz	Disaggregiertes Szenario	Differenz Szenarien
Summe Energie-Bilanz	[MWh/a]	3350,91	3846,94	-496,03
Summe CO₂-Bilanz	[t/a]	724,50	2176,12	-1451,62

*(+ Ausstoß / - Einsparung)

Tabelle 22: Parameter für die Bilanzierung

Parameter	Einheit	SAmpSONS	DWA-KA 1.6
CO₂ Parameter			
		kg CO ₂ -eq	kg CO ₂ -eq
Strom	kWh	0,61	0,56
Transport_Lorry_22	tkm	0,06	0,10
Transport_Lorry_11	tkm	0,07	
Diesel	l	2,97	-

Wärme	kWh	0,24	0,25
Primärenergie Faktoren			
		kWh	kWh
Strom	kWh	3,11	2,80
Wärme	kWh	1,09	1,10
Transport_Lorry_22	tkm	0,23	-
Transport_Lorry_11	tkm	0,28	-
Diesel	l	11,81	13,00

Abschließend dienen die nachstehenden Grafiken als Beispiel für von SAmPSONS automatisch generierten Plots – die Treibhausgasemissionen im Betrieb – aggregiert (Abbildung 54) und nach Technologie aufgeschlüsselt (Abbildung 55).

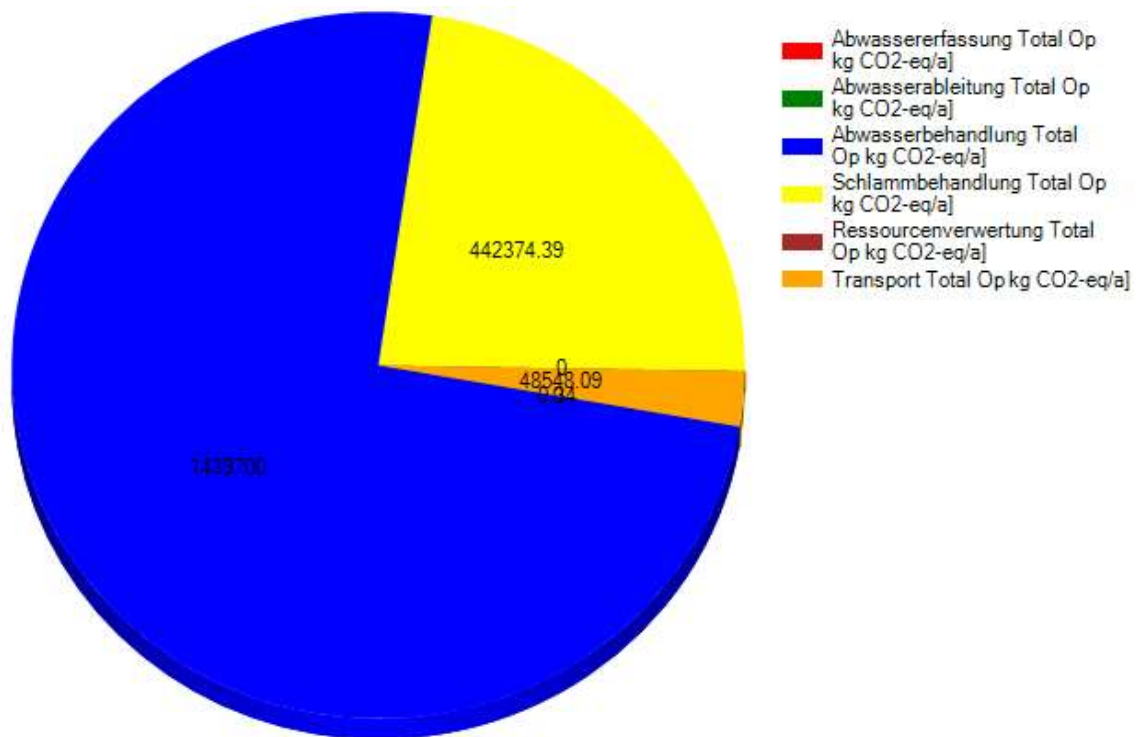


Abbildung 50: Disaggregiertes Szenario: Treibhausgasemissionen im Betrieb (gruppiert)

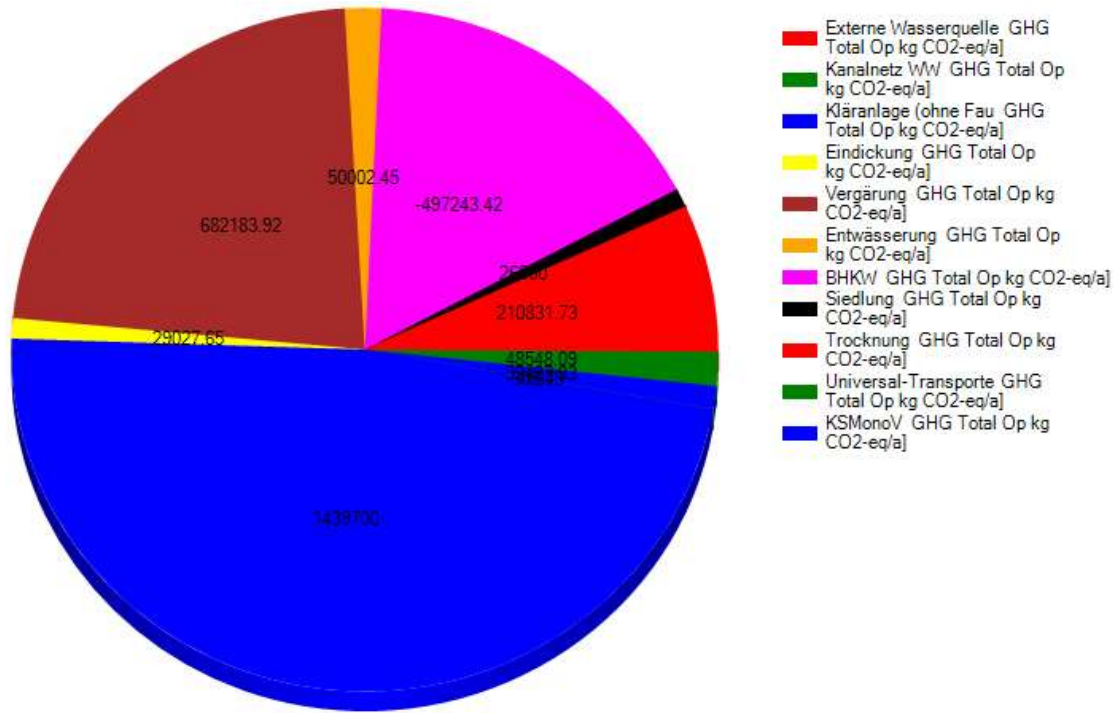


Abbildung 51: Disaggregiertes Szenario: Treibhausgasemissionen im Betrieb (aufgeschlüsselt nach einzelnen Komponenten)

Fazit

Der Vergleich des disaggregierten Szenarios mit dem aggregierten Szenario zeigt, dass disaggregierte Blöcke genauere und detailliertere Ergebnisse liefern. Diese Ergebnisse sind nützlich für die Untersuchung von Konzentrat und verschiedenen Schlammarten.

Aggregierte Blöcke liefern akkumulierte Ergebnisse und sind praktisch für eine schnelle und einfachere vorläufige Schätzung.

3.4.8 Fallbeispiel 7: Vergleich unterschiedliche P-Rückgewinnungstechnologien (BCE)

Das Fallbeispiel behandelt den Vergleich der Ergebnisse der Modellierung von Systemen mit unterschiedlichen P-Rückgewinnungsverfahren in SAmPSONS mit den Ergebnissen des Forschungsvorhabens im Auftrag des Umweltbundesamtes „Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung“ (Kraus et al. 2019) (im Folgenden „PHORWÄRTS-Bericht“). Der Fokus liegt im Folgenden auf den Treibhausgasemissionen (THG) und dem Primärenergiebedarf (PE).

3.4.8.1 Überblick über die Verfahren zur P-Rückgewinnung in SAmPSONS

In SAmPSONS sind verschiedene Verfahren der Phosphor (P)-Rückgewinnung integriert. Dabei werden unterschiedliche Ansatzpunkte der P-Rückgewinnung berücksichtigt. Grundlage für die Auswahl der Verfahren für SAmPSONS war es, möglichst unterschiedliche Ansatzpunkte abzubilden mit unterschiedlichen Produkten, sowie die Praxisrelevanz der Verfahren (gute Datengrundlage bzw. großtechnisch umgesetzt). Tabelle 23 gibt einen Überblick über die in SAmPSONS berücksichtigten Verfahren.

Tabelle 23: In SAmPSONS berücksichtigte P-Rückgewinnungsverfahren (modifiziert auf Basis von Kraus et al., 2019)

Bezeichnung/ Verfahren	Ansatzpunkt	Produkt	Entwicklungs- stand	Voraussetzung
Fällung im Faulschlamm (ohne Rücklösung), z.B. AirPrex	Faulschlamm	Struvit	Großtechnik	Bio-P
Fällung im Zentrat (ohne Rücklösung), z.B. Pearl, NuReSys	Zentrat	Struvit	Großtechnik	Bio-P
TetraPhos	Asche nach der Monoverbrennung	H ₃ PO ₄	Pilot, Großtechnik im Bau	Monoverbrennung
AshDec	Asche nach der Monoverbrennung	AshDec-Produkt	Pilot	Monoverbrennung
Pyreg	Klärschlamm	Klärschlammkarbonisat	Großtechnik	TS-Gehalt 80%

3.4.8.2 Grundlagen Fallbeispiel und Vergleich mit SAmPSONS

Im PHORWÄRTS-Bericht werden die ökobilanziellen Auswirkungen (Treibhausgasemissionen, kumulierter Energieaufwand fossil und nuklear, Eutrophierungspotenzial) verschiedener P-Rückgewinnungsverfahren im Vergleich zu einem Referenzsystem untersucht. Das Referenzsystem besteht aus einer typischen Großkläranlage (Behandlung und Entsorgung von Primär- und Überschussschlamm) in Deutschland für 1 Mio. EW. Die Klärschlamm Entsorgung wird einer für Deutschland typischen Monoverbrennung zugeordnet. Die ökologischen Auswirkungen verschiedener Technologien zur P-Rückgewinnung werden entlang der Systemkette „Eindickung – Faulung – Entwässerung – Entsorgung“ im Vergleich zum Referenzsystem (ohne P-Rückgewinnung) betrachtet. Der rückgewonnene Phosphor wird dabei als Gutschrift berücksichtigt.

Darüber hinaus gelten die folgenden Grundlagen bei der Ermittlung der ökobilanziellen Auswirkungen unterschiedlicher P-Rückgewinnungsverfahren im PHORWÄRTS-Bericht:

Betrachtet werden:

- Zusätzliche Infrastruktur durch die Implementierung eines P-Rückgewinnungsverfahrens (bestehende Infrastruktur wird nicht berücksichtigt)
- Alle wesentlichen Hintergrundprozesse in Bezug auf den Betrieb (Bedarf von elektrischem Strom, Wärme, Chemikalien, Brennstoffe, Additive)
- Gutschriften für produzierte Güter (elektrischer Strom in BHKW oder Verbrennung, Abwärme, zurückgewonnene Chemikalien, Stickstoff- und Phosphatdünger)
- Transport des zurückgewonnenen Materials (pauschal mit 200 km)
- Verwertung des zurückgewonnenen Materials in der Landwirtschaft
- Keine Unterscheidung in Bezug auf die Düngewirkung (d.h. Pflanzenverfügbarkeit) der Produkte

Der Ansatz bei der Betrachtung der Treibhausgasemissionen und dem kumulierten Energieaufwand ist mit dem in SAmpSONS vergleichbar. Im Gegensatz dazu werden bezogen auf das Eutrophierungspotenzial unterschiedliche Ansätze verfolgt. Aus diesem Grund wurden diese im Fallbeispiel nicht weiter berücksichtigt.

Für den Vergleich wurden drei verschiedene Systeme analog zum PHORWÄRTS-Bericht in SAmpSONS aufgebaut:

1. Das Referenzsystem (Abbildung 52),
2. ein System mit dem Rückgewinnungsverfahren AshDec (Abbildung 53) und
3. ein System mit dem Rückgewinnungsverfahren TetraPhos (Abbildung 54).

Tabelle 24 beschreibt die Komponenten der Systeme und deren Abbildbarkeit in SAmpSONS.

Tabelle 24: Darstellung der im PHORWÄRTS-Bericht beschriebenen Technologien und deren Abbildung in SAmpSONS

PHORWÄRTS-Bericht	
Komponenten	Abbildbar in SAmpSONS
Mengen und Frachten	Ja
Eindickung von Primär- und Überschussschlamm	Ja
Gemeinsame Schlammfäulung und Biogasverwertung in einem BHKW	Ja
Schlammmentwässerung	Ja
Behandlung der Rückbelastung	Ja
Trocknung	Ja
Monoverbrennung	Ja
Ascheentsorgung (Deponierung)	Ja

Verfahren zur P-Rückgewinnung (AshDec/TetraPhos)	Ja
Transport (Asche/Produkte)	Ja
Gutschrift für Phosphat-Dünger	Ja

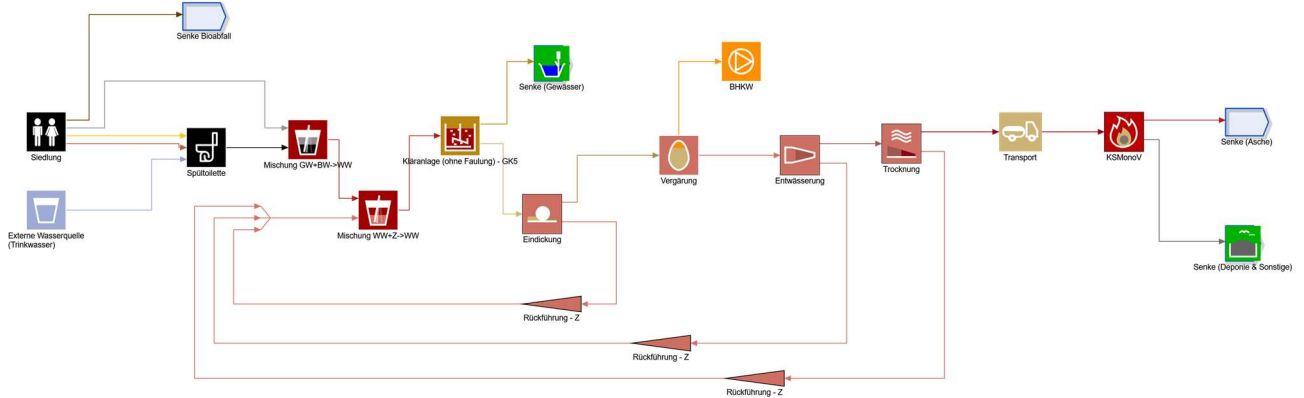


Abbildung 52: Darstellung des Referenzsystems in SAMPSONS

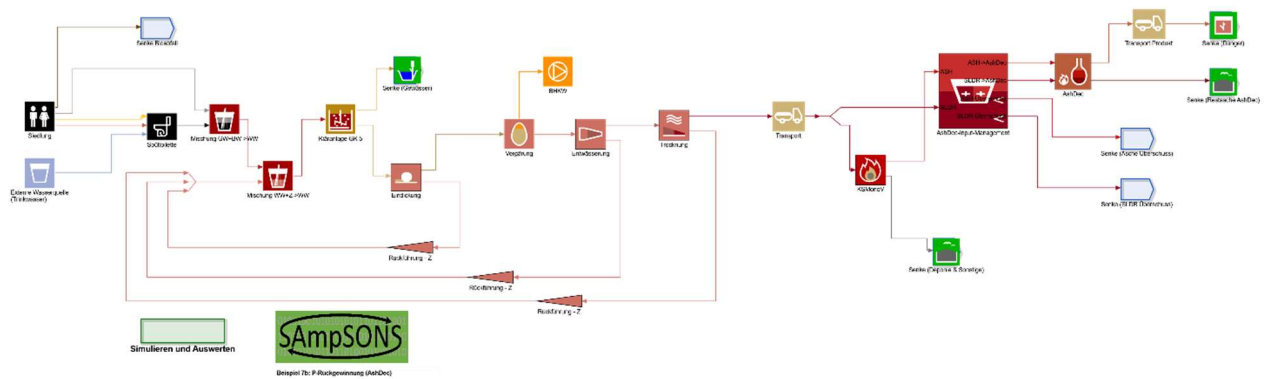


Abbildung 53: Darstellung des System mit dem Rückgewinnungsverfahren AshDec in SAMPSONS

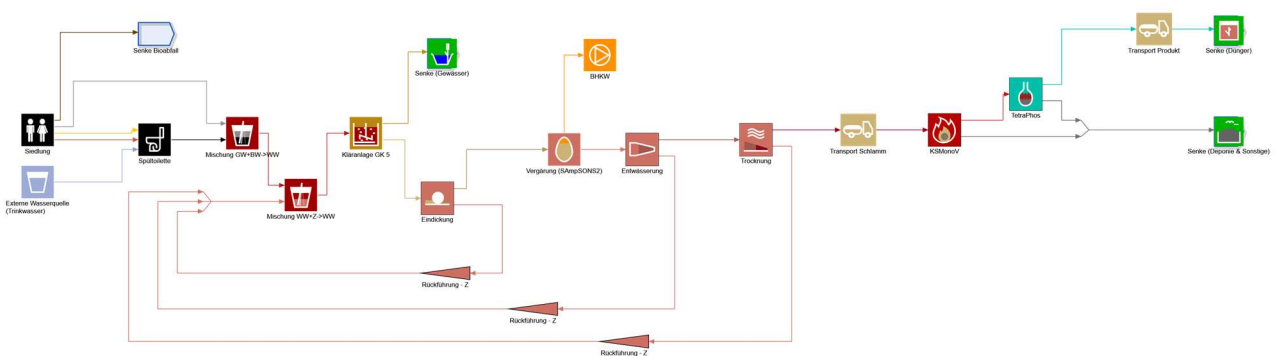


Abbildung 54: Darstellung des System mit dem Rückgewinnungsverfahren TetraPhos in SAMPSONS

3.4.8.3 Vergleich der Ergebnisse in SAmpSONS mit den Ergebnissen im PHORWÄRTS-Bericht

Vor dem Vergleich der ökologischen Auswirkungen der einzelnen P-Rückgewinnungsverfahren wurden zunächst die einzelnen Stoffströme und Frachten der Referenzsysteme miteinander verglichen. Teilweise waren geringe Anpassungen der Parameterwerte notwendig, um möglichst vergleichbare Grundvoraussetzungen zu schaffen. Dennoch zeigte sich bereits zu Beginn, dass die einzelnen betrachteten Stoffströme und deren Frachten eine sehr gute Vergleichbarkeit aufwiesen.

Tabelle 25 zeigt den Vergleich der einzelnen Stoffströme und deren Frachten zwischen dem PHORWÄRTS-Bericht und der Simulation in SAmpSONS nach geringfügigen Anpassungen. Bereits vor den Anpassungen betrug der P-Gehalt in der Asche 117 g P / kg Asche. In Deutschland bewegt sich die Phosphorkonzentration der Klärschlamm-asche zwischen 20 und 120 g P/kg Asche, bei Monoverbrennung von ausschließlich kommunalem Klärschlamm zwischen 80 und 120 g P/kg Asche (Kraus et al. 2019, S. 140). Damit liegen die Ergebnisse in SAmpSONS bereits ohne Anpassungen in einem realistischen Rahmen. Mit Anpassungen liegen sie mit 105 g P/kg nahe an den Werten des PHORWÄRTS-Berichtes.

Tabelle 25: Vergleich der Stoffströme und der Frachten zwischen dem PHORWÄRTS-Bericht und der Simulation in SAmpSONS

	Phorwärts-Bericht	SAmpSONS
Jährlicher Abwasseranfall in der Kläranlage (inkl. Rückführung)	55.000.000 m³/a bzw. 150.685 m³/d	44.000.000 m³/a bzw. 121.000 m³/d
Q vor der Schlammfäulung/Vergärung	1.308 m³/d	1.200 m³/d
Q vor der Entwässerung (Faulschlamm)	1226 m³/d	1200 m³/d
Q nach der Entwässerung (Entwässerter Schlamm)	175 m³/d	181 m³/d
Input KS-Monoverbrennung	175 m³/d	181 m³/d
Output KS-Monoverbrennung (Asche)	15,4 t/d	16,2 t/d
TS-Gehalt Input Vergärung	~ 6 % TS	~ 6 %TS
oTS-Gehalt Input Vergärung	62,2 t/d (79,3 % der TS)	64 t/d (87 % der TS)
TS-Gehalt Input Entwässerung	~ 4 % TS	~ 3 %
oTS-Gehalt Input Entwässerung	30 t/d (65 % der TS)	28,4 t/d (78 % der TS)
TS-Gehalt Output Entwässerung	~ 22 %	~ 20 %
oTS-Gehalt Output Entwässerung	29 t/d	27,6 t/d

CSB vor Schlammfäulung	87 t/d	92 t/d
N vor Schlammfäulung	4,8 t/d	4,6 t/d
P vor Schlammfäulung	1,7 t/d	1,9 t/d
TP vor Schlammfäulung	22 g/kg TS	26 g/kg TS
CSB vor der Entwässerung	42 t/d	44 t/d
N vor der Entwässerung	4,8 t/d	4,6 t/d
P vor der Entwässerung	1,6 t/d	1,9 t/d
TP vor Entwässerung	37 g/kg TS	52 g/kg TS
CSB nach der Entwässerung	40 t/d	41 t/d
N nach der Entwässerung	3,6 t/d	1,2 t/d
P nach der Entwässerung	1,5 t/d	1,8 t/d
P nach der Monoverbrennung	1,5 t/d	1,7 t/d
P nach der Monoverbrennung	95 g P/kg	105 g P/kg

Vergleich der ökologischen Auswirkungen – Primärenergiebedarf [MJ/(EW*a)]

Anschließend erfolgte ein Vergleich des Primärenergiebedarfes der betrachteten P-Rückgewinnungsverfahren zwischen den Ergebnissen des PHORWÄRTS-Berichtes und denen aus SAmpSONS. Auch hier ergeben sich die Gutschriften/zusätzlichen Aufwendungen aus den Abweichungen zum Referenzsystem. Die Resultate sind in Tabelle 26 dargestellt. Diese zeigen auf den ersten Blick größere Abweichungen. Im PHORWÄRTS-Bericht beträgt der zusätzliche Primärenergiebedarf einer P-Rückgewinnung mittels AshDec-Verfahren 3,2 MJ/(EW*a), beim TetraPhos-Verfahren 1,6 MJ/(EW*a). Der Energiebedarf liegt bei beiden Systemen leicht über dem des Referenzmodells. In SAmpSONS benötigt das System mit einer P-Rückgewinnung mittels AshDec-Verfahren 28,7 MJ/(EW*a) mehr als das Referenzsystem. Bei dem System mit TetraPhos liegt der Primärenergiebedarf deutlich unter dem des Referenzsystems, es werden 14 MJ/(EW*a) weniger verbraucht.

Tabelle 26: Ergebnisse des Vergleiches des Primärenergiebedarfs der unterschiedlichen P-Rückgewinnungsverfahren

Kumulierter Energieaufwand bzw. Primärenergiebedarf	Phorwärts	SAmpSONS	
AshDec	3,2	28,7	MJ/(EW*a)
TetraPhos	1,6	- 14	MJ/(EW*a)

Im Einzelnen zeigt sich, dass die Vergleichbarkeit der Ergebnisse einerseits stark abhängt von dem jeweiligen Aspekt, der betrachtet wird, und andererseits unterschiedliche Vorgehensweisen beim PHORWÄRTS-Bericht bzw. SAmpSONS zu verschiedenen Ergebnissen führen, wie die detaillierten Vergleiche zeigen (Abbildung 55 und Abbildung 56).

Beim AshDec-Verfahren zeigen sich größere Abweichungen zwischen den Ergebnissen des PHORWÄRTS-Berichtes und denen in SAmpSONS bei der Gutschrift für den P-Dünger (Faktor 2) und geringere, aber dennoch deutliche Unterschiede bei dem Aufwand für die Chemikalien und dem Energiebedarf für die Rückgewinnung.

Die Gutschrift der P-Dünger hängt wesentlich von zwei Faktoren ab: 1. Den Annahmen über das, was letztendlich als rückgewinnbares Phosphor zur Verfügung steht (in SAmpSONS wird das durch die Einstellungen in den Senken widerspiegelt) und 2. den Emissionsprofilen für die Bewertung des Primärenergiebedarfes. Diese ergeben sich aus den Einsparungen durch die Substitution von mineralischem Phosphor-Dünger durch Rezyklate aus der Klärschlammasche. Insbesondere unterschiedliche Annahmen hinsichtlich dieser Emissionsprofile spielen bei der Abweichung der Ergebnisse vermutlich eine große Rolle. Da aber nicht alle Annahmen des PHORWÄRTS-Berichtes im Detail für den Vergleich der Fallbeispiele vorlagen, lässt sich nicht abschließend beurteilen, wie die Abweichung zustande kommt. Dennoch bleibt festzuhalten, dass die Abweichung insgesamt als vertretbar angesehen werden kann.

Bei den Chemikalien zeigen die Ergebnistabellen, dass die Berechnungen in SAmpSONS korrekt durchgeführt werden. Die Differenzen liegen daher mit hoher Wahrscheinlichkeit in den unterschiedlichen Emissionsprofilen, die zur Bewertung der Primärenergiebedarfe für die Bereitstellung der Chemikalien herangezogen werden. Die Ergebnisse zu Treibhausgasmissionen und zum Primärenergiebedarf des TetraPhos-Verfahrens stützen diese Annahme (siehe unten). Bezüglich der Aufwendungen für die Energiebedarfe liegen die Unterschiede vermutlich an unterschiedlichen Grundannahmen und den sich daraus ergebenden Abweichungen.

Eine Besonderheit des AshDec-Verfahrens stellt die Gutschrift für die Ascheentsorgung dar. Dadurch, dass fast die gesamte Asche durch das Verfahren zu einem Düngerprodukt wird (AshDec-Produkt), entfallen die Aufwendungen für die Entsorgung fast vollständig. Generell wird bei der Monoverbrennung in SAmpSONS die Annahme vertreten, dass nur ein geringer Teil der Asche als Abfall tatsächlich deponiert werden muss. Der weit größere Teil der monoverbrannten Asche wird zwischengelagert, um einer späteren P-Rückgewinnung zur Verfügung zu stehen, und verursacht dementsprechend keine Umweltwirkungen. Das hat zur Folge, dass die Gutschriften für die vermiedene Entsorgung zunächst nicht auftauchen. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, wurde für dieses Fallbeispiel in SAmpSONS angenommen, dass auch dieser Teil der Asche aus der Monoverbrennung Umweltwirkungen verursacht. Dementsprechend wurde der Anteil an Sondermüll (in SAmpSONS „Percentage of inflow to be considered as hazardous waste (perc_hazwaste)“) in den jeweiligen Senken („Asche“ beim Referenzbeispiel, „Deponie & Sonstige“ bei TetraPhos und „Restasche AshDec“ bei AshDec) auf jeweils 20 % gesetzt.

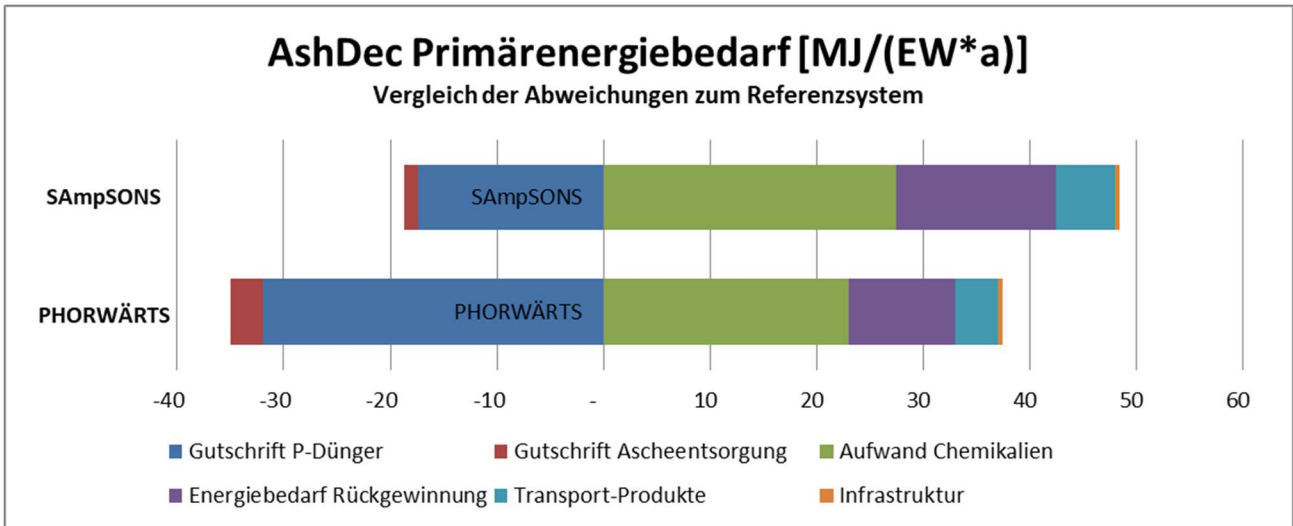


Abbildung 55: Ergebnisse des detaillierten Vergleiches des Primärenergiebedarfs [MJ] des AshDec-Verfahrens

Die Ergebnisse bezüglich des TetraPhos-Verfahrens zeigen ähnliche Abweichungen. Zunächst liegt auch hier die Gutschrift für den P-Dünger beim PHORWÄRTS-Bericht deutlich höher als in SAmPSONS. Die Gutschrift für die rückgewonnenen Nebenprodukte beziehen sich auf Fällungsmittel, die beim TetraPhos-Verfahren entstehen und in der Kläranlage eingesetzt werden können. Diese sind in SAmPSONS um knapp den Faktor 10 höher als im PHORWÄRTS-Bericht. Ursache hierfür sind ebenfalls die unterschiedlichen Ansätze bei der Bewertung im Rahmen der Emissionsprofile: Beim PHORWÄRTS-Bericht beruht die Berechnung der Gutschriften auf den Daten für Grünsalz (Eisen-II-Sulfat). Da in SAmPSONS kein passender Datensatz mit einem geeigneten Umweltprofil gefunden werden konnte, wurde als Abschätzung das Umweltprofil von Eisen-II-Chlorid verwendet. Dies führt vermutlich zur Überschätzung der damit verbundenen Gutschriften.

Ebenso wie bei dem System mit dem AshDec-Verfahren zeigen sich in SAmPSONS erhöhte Primärenergieaufwände für die Bereitstellung von Chemikalien und den Energiebedarf für die Rückgewinnung. Die Unterschiede beim Transport sind vernachlässigbar und liegen vermutlich an unterschiedlichen Annahmen in diesem Block, beispielsweise bezogen auf den Dieselverbrauch oder die Größe und Auslastung der Transportfahrzeuge.

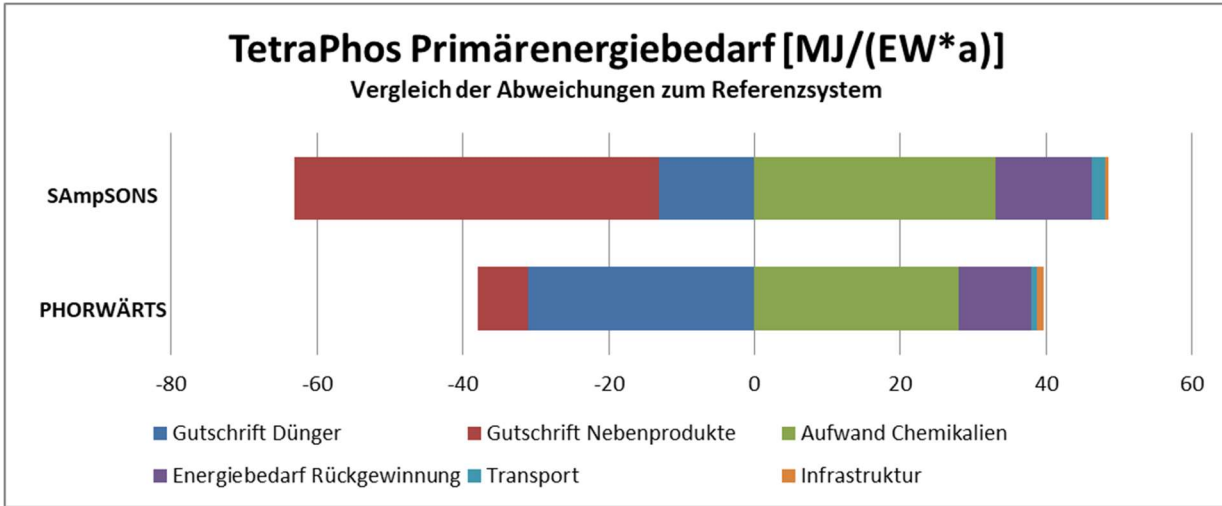


Abbildung 56: Ergebnisse des detaillierten Vergleiches des Primärenergiebedarfs [MJ] des TetraPhos-Verfahrens

Vergleich der ökologischen Auswirkungen – Treibhausgaspotenzial [kg CO₂-eq/(EW*a)]

Bezogen auf das Treibhausgaspotenzial sind im PHORWÄRTS-Bericht beide Verfahren nahezu neutral zu werten. Das TetraPhos-Verfahren weist ein zusätzliches Treibhausgaspotenzial von 0,1 kg CO₂-eq/(EW*a) auf, das AshDec-Verfahren 0,8 kg CO₂-eq/(EW*a). In SAmpSONS hängen die Werte beim AshDec-Verfahren stark von den bereits angesprochenen Einstellungen in den Senken ab. Wenn die Einstellungen bei allen drei Systemen bezüglich dem Anteil an Sondermüll wie oben beschrieben bei jeweils 20 % liegen, schneidet das AshDec-Verfahren sogar leicht besser ab als das Referenzsystem (-2,13 kg CO₂-eq/(EW*a)). Wenn dagegen nur die Senken „Deponie & Sonstige“ und „Restasche AshDec“ berücksichtigt werden, weist das AshDec-Verfahren ein leicht erhöhtes Treibhausgaspotenzial von 2,4 kg CO₂-eq/(EW*a) auf. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 27 dargestellt. Das TetraPhos-Verfahren weist in SAmpSONS Gutschriften von 2,8 kg CO₂-eq/(EW*a) auf, es entstehen also weniger Treibhausgase als bei einem System ohne das TetraPhos-Verfahren. Dies ist im Wesentlichen auf die relativ hohe Gutschrift für die Nebenprodukte in SAmpSONS zurückzuführen (siehe oben).

Tabelle 27: Ergebnisse des Vergleiches des Treibhausgaspotenzials der unterschiedlichen P-Rückgewinnungsverfahren

Treibhausgaspotenzial	Phorwärts	SAmpSONS	
AshDec	0,8	2,4	kg CO ₂ -eq/(EW*a)
TetraPhos	0,1	- 2,8	kg CO ₂ -eq/(EW*a)

Die detaillierten Ergebnisse der Treibhausgaspotenziale der unterschiedlichen P-Rückgewinnungsverfahren sind in Abbildung 57 und Abbildung 58 dargestellt. Beim AshDec-Verfahren zeigt sich bei den Gutschriften für die Ascheentsorgung beim Treibhausgaspotenzial eine

Abweichung der Ergebnisse zwischen dem PHORWÄRTS-Bericht und der Simulation in SAmpSONS. Hier kommt die bereits beschriebene Herausforderung bei der Einstellung der Senken in SAmpSONS zum Tragen.

Ebenso zeigt sich, wie bereits beim Primärenergiebedarf, dass die Gutschrift für den P-Dünger in SAmpSONS leicht unterschätzt wird. Die unterschiedlichen Bewertungsansätze bei den Chemikalien führen auch hier zu einer leichten Überschätzung in SAmpSONS. Insgesamt ist die Vergleichbarkeit jedoch sehr gut.

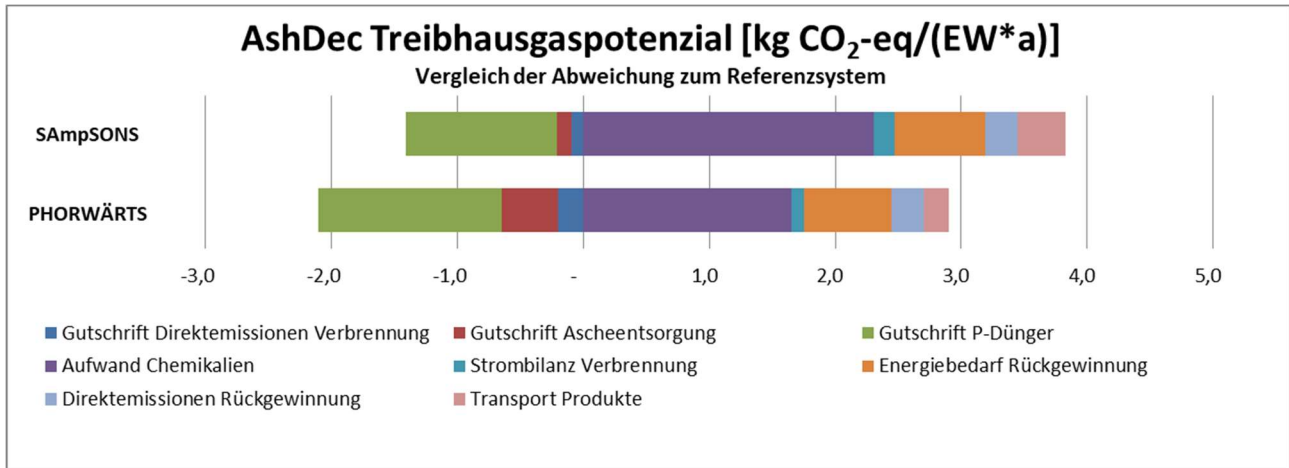


Abbildung 57: Ergebnisse des detaillierten Vergleichs des Treibhausgaspotenzials des AshDec-Verfahrens. Die Ergebnisse zeigen beim TetraPhos-Verfahren ein ähnliches Bild. Die Düngergutschriften werden leicht unterschätzt, der Energiebedarf für die Rückgewinnung und den Transport wird leicht überschätzt. Wie bereits bei den Ergebnissen zum Primärenergiebedarf werden die Gutschriften für die Nebenprodukte in SAmpSONS deutlich höher angesetzt, die Begründung liegt hier ebenfalls in den unterschiedlichen Bewertungsansätzen.

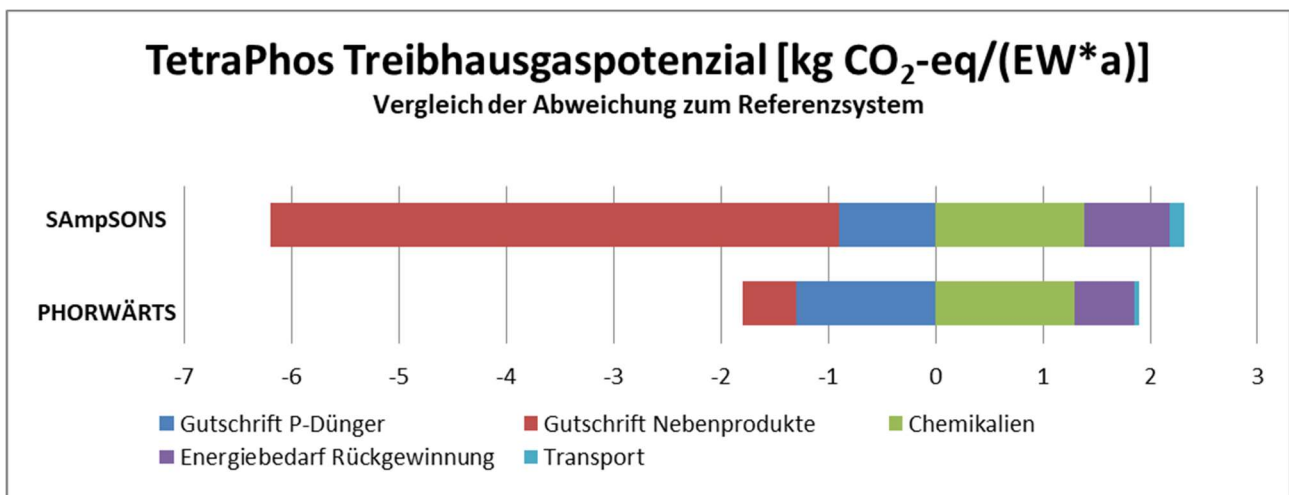


Abbildung 58: Ergebnisse des detaillierten Vergleichs des Treibhausgaspotenzials des TetraPhos-Verfahrens

3.4.8.4 Fazit Fallbeispiele zur P-Rückgewinnung

Zunächst fällt bei der Betrachtung der Stoffströme und Frachten die gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse in SAmpSONS mit den Daten im PHORWÄRTS-Bericht auf. Grundsätzlich war dies bereits am Ende der ersten Projektlaufzeit gegeben, es wird aber deutlich, dass die Ergebnisse noch exakter geworden sind was im Wesentlichen auf eine Verbesserung der Datengrundlage zurückzuführen ist. Nach wie vor bietet SAmpSONS darüber hinaus eine hohe Flexibilität bei der Anpassung dieser Stoffströme und Frachten, so dass die Ergebnisse bei Bedarf durch eine Anpassung der Parameter sehr fein nachjustiert werden können. Dies gilt für alle im Fallbeispiel betrachteten Technologien und darüber hinaus insgesamt für die Qualität der Ergebnisse in SAmpSONS.

Insgesamt ist die Flexibilität sowohl bei der Auswahl der Technologien (z.B. P-Rückgewinnungstechnologien) als auch bei der Abbildung der Stoffströme (z.B. Darstellung des Rücklaufes) gestiegen. Dies führt einerseits dazu, dass noch exaktere Abbildungen von Abwassermanagementszenarien möglich sind, andererseits steigt dadurch auch die Komplexität.

Die Auswertung der Fallbeispiele zu den Umweltwirkungen (Primärenergiebedarf und Treibhausgaspotenzial) der P-Rückgewinnungsverfahren AshDec und TetraPhos zeigen grundsätzlich bei beiden Verfahren eine akzeptable bis gute Vergleichbarkeit. Im Einzelnen sind die Abweichungen der Ergebnisse in SAmpSONS nachvollziehbar. Folgende Schlussfolgerungen lassen sich hier festhalten:

- Die unterschiedlichen Bewertungsansätze im Rahmen der Emissionsprofile führen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Es ist daher bei einem Vergleich relevant, welche Ansätze zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen herangezogen werden. Dies kann im Einzelfall zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Im vorliegenden Beispiel werden die Aufwendungen für Chemikalien in SAmpSONS sowohl beim Treibhausgaspotenzial als auch beim Primärenergiebedarf mit unterschiedlicher Ausprägung überschätzt.
- Durch die erweiterten Möglichkeiten der Einstellungen in den Senken (Anteil an Sondermüll, etc.) ist SAmpSONS noch einmal flexibler geworden. Diese Flexibilität führt aber auch dazu, dass die Einstellungen komplex sind und sehr genau überprüft werden müssen. Im Einzelfall kann es sinnvoll sein, unterschiedliche Einstellungen auszuprobieren.
- Die Gutschrift für P-Dünger wird in SAmpSONS im Vergleich zum PHORWÄRTS-Bericht sowohl beim Treibhausgaspotenzial als auch beim Primärenergiebedarf unterschätzt. Da die Datengrundlage des PHORWÄRTS-Berichtes nicht in Gänze vorliegt und gewisse Annahmen implizit getroffen werden kann dies hier nicht abschließend beurteilt werden. Grundsätzlich ist die Genauigkeit für eine Grobplanung ausreichend.
- Der Energiebedarf für die Rückgewinnung wird in SAmpSONS beim Primärenergiebedarf bei beiden P-Rückgewinnungsverfahren und beim Treibhausgaspotenzial beim TetraPhos-Verfahren leicht überschätzt im Vergleich zum PHORWÄRTS-Bericht.
- Die Aufwände weisen insgesamt eine gute Vergleichbarkeit auf. Hier zeigt sich der fortgeschrittene Entwicklungsstand dieses Aspektes in SAmpSONS deutlich.

4 Fazit und Ausblick

Der Vergleich von verschiedenen Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen für die Sanitärversorgung erfordert die Berücksichtigung mannigfaltiger Aspekte. Heutzutage sind diese nicht nur auf die Kosten zu beschränken. Immer stärker besteht der Wunsch, die Nachhaltigkeit über geeignete Indikatoren entsprechend in den Untersuchungen darzustellen. Aber auch die besonderen Herausforderungen, die z.B. Krankenhäuser und Pflegeeinrichtungen hinsichtlich ihrer spezifischen Frachten bezüglich Medikamentenreste und pathogener Keime für das Gesamtsystem darstellen, müssen zukünftig stärkere Beachtung finden. Dazu wurde im SAmpSONS-Projekt ein geeigneter Kriterienkatalog erstellt (vgl. Abschnitt 3.1.1) und in einem computergestützten Tool umgesetzt.

SAmpSONS gibt Planer*innen, Verwaltungsmitarbeiter*innen, Architekt*innen usw. die Möglichkeit, verschiedene Szenarien bei der Vorplanung von Sanitärsystemen hinsichtlich unterschiedlicher Teilziele wie Ökologie, Ökonomie und Soziales miteinander zu vergleichen.

In der ersten Projektphase wurden zu implementierende Verfahren ausgewählt und für diese nach Basis- und Planungsdaten gesucht (siehe Kapitel 2). Diese Daten wurden aufbereitet und in einem einheitlichen Format als Daten-Steckbriefe zusammengestellt. Die Datenlage erwies sich hierbei als teilweise lückenhaft und erforderte einen unerwartet hohen Rechercheaufwand. [In Projektphase 2 wurden die Verfahrensblöcke aus Phase 1 um weitere Spurenstoffe erweitert sowie die ursprüngliche Bibliothek von Verfahrensblöcken um zahlreiche weitere erweitert, siehe Abbildung 1 und Anhang 1 für einen vollständigen Überblick aller in SAmpSONS2 integrierten Verfahrensblöcke.](#)

Im nächsten Schritt wurde ein möglichst einfach handhabbarer und ausreichend flexibler Simulator zur überschlägigen Modellierung und Darstellung der Stoffströme von konventionellen und ressourcenorientierten Sanitärsystemen erarbeitet, mit dem die Verfahren aus den Daten-Steckbriefen kombiniert und verglichen werden können.

[Der SAmpSONS-Simulator selbst wurde in der Projektphase 2 um etliche Features ergänzt, zugleich wurde Nutzerfeedback von Nutzern innerhalb und außerhalb des Projektteams eingearbeitet. Neben der Integration zusätzlicher Technologien des Abwassermanagements, insbesondere der Schlammbehandlung, P-Rückgewinnung und von Technologien der 4. Reinigungsstufe, zählen dazu die Möglichkeit zur Auswertung weiterer Spurenstoffe \(fünf ausgewählte Spurenstoffe zuzüglich dreier nutzerdefinierter Spurenstoffe\). Wesentliche Erweiterungen im Simulatorekern bestehen u. a. in der Integration von Rückführungsschleifen, der Integration der Berechnung des Indikators „Resilienz“, Erweiterungen in der Kostenrechnung \(Verzinsung\), Berechnung der Düngemittelgutschriften, erweiterte Aggregationen und Ausgaben von Berechnungsergebnissen in tabellarischer und grafischer Form sowie die Unterstützung vergleichender Auswertungen mehrerer Simulationsläufe.](#)

Nach weitgehender Fertigstellung von SAmpSONS und ersten Tests der Verfahrensblöcke auf Basis einer vorläufigen Testversion des Simulators wurde die Validierung durchgeführt. Dazu wurden vier bereits in anderen Projekten intensiv untersuchte Fallbeispiele mit Referenzdaten genutzt: Wohlsborn, der DWA-Arbeitsbericht, Birkenfeld und Stahnsdorf. Es erfolgte ein Vergleich der Referenzdaten mit den von SAmpSONS generierten Ergebnissen. Anhand der Auswertungen konnten die erhobenen Default-Werte getestet und validiert werden. [Nach der Erweiterung von](#)

SAmpSONS in Projektphase 2 wurden drei weitere Fallbeispiele, i.e. der Vergleich von aggregierten und disaggregierten Verfahrensblöcken zur Klärschlammbehandlung, der Vergleich von drei verschiedenen 4. Reinigungsstufen und der Vergleich von unterschiedlichen P-Rückgewinnungsverfahren ausgewertet (siehe Kapitel 3.4).

Dabei zeigte sich, dass grundsätzlich eine gute Vergleichbarkeit gegeben ist und SAmpSONS somit zur Unterstützung der Grobplanung von Sanitärsystemen verwendet werden kann (zu Details der Auswertung der Fallbeispiele siehe Kapitel 3.4.1 bis 3.4.8). An einigen Stellen zeigte sich allerdings auch, dass die in SAmpSONS enthaltenen Verfahrensblöcke mit ihren spezifischen Daten nicht allgemeingültig für alle Anwendungsgebiete und Situationen verwendet werden können. Z.B. unterscheiden sich einzelne Abwasserreinigungstechnologien teilweise stark. Sowohl mit der in SAmpSONS2 erweiterten Bibliothek von Verfahrensblöcken und den Möglichkeiten in SAmpSONS, Default-Werte anzupassen, kann eine Vielzahl von unterschiedlichen Abwassermanagementszenarien abgebildet werden. Dabei wird Nutzer*innen empfohlen, die Informationen in den Daten-Steckbriefen für die einzelnen Technologien genau zu beachten und für die gewünschten Simulationen fallstudien-spezifisch anzupassen.

Insgesamt ist die Flexibilität sowohl bei der Auswahl der Technologien (z.B. P-Rückgewinnungstechnologien) als auch bei der Abbildung der Stoffströme (z.B. Darstellung des Rücklaufes) in Projektphase 2 gestiegen. Dies führt einerseits dazu, dass noch exaktere Abbildungen von Abwassermanagementszenarien möglich sind, andererseits steigt dadurch auch die Komplexität.

Für eine Anpassung der Default-Werte ist es erforderlich, dass die Nutzer*innen von SAmpSONS sowohl mit den systeminhärenten Funktionalitäten des Tools vertraut sind und auch die verfahrensblock-spezifischen Daten beurteilen und ggf. modifizieren können.

Ferner wurde das Tool einer erweiterten potentiellen Nutzer*innenschaft vorgestellt und dessen zukünftige Anwendung und Verstetigung vorangetrieben. Mit der vorliegenden Version von SAmpSONS2 steht ein Simulationstool zur Verfügung, das flexibel auf unterschiedlichste Abwasserinfrastrukturszenarien anwendbar ist.

SAmpSONS steht der interessierten Fachöffentlichkeit im Internet unter <https://www.ifak.eu/de/produkte/sampsons> zum kostenlosen Download zur Verfügung. Im Programmpaket stehen zur Unterstützung der Nutzer*innen ein Kurzhandbuch zur Benutzung des Programms (in deutsch und in englisch), sowie Hilfedateien (ebenfalls zweisprachig) mit Kurzerläuterungen zu den implementierten Technologien zur Verfügung. Darüber hinaus ist auch dieser Abschlussbericht sowie die Sammlung der Technologiesteckbriefe und die umfangreiche Literaturübersicht zu Spurenstoffen in Abwassersystemen in das Hilfesystem des Programms integriert.

Die großen Vorteile von SAmpSONS liegen in

- 1) der Verfügbarkeit von Default-Werten für eine große Auswahl von Technologien im Bereich von ROSS und konventionellen Abwassersystemen, die eine Bewertung der Technologien für eine Vielzahl von Nachhaltigkeitsindikatoren ermöglichen;
- 2) der unkomplizierten Anpassbarkeit der in SAmpSONS hinterlegten Default-Werte;
- 3) der unmittelbaren Möglichkeit, die Auswirkungen dieser Anpassungen auf die Stoffströme und Nachhaltigkeitswirkungen auf Knopfdruck sichtbar zu machen.

5 Literatur

- FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI (2016): *Transitionswege WasserinfraSTRuktursysteme (TWIST++)*, abgerufen am 7. Juni 2016, von <http://www.twistplusplus.de/>
- CAMPOS, L., JAIN, V., SCHÜTZE, M. (2012): *Simulating Nutrient and Energy Fluxes in Non-networked Sanitation Systems*, Faecal Sludge Management Conference, Durban, 29.10. – 01.11.2012.
- DIN ISO 14040: 2006, *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*.
- DWA (2017): *Neuartige Sanitärsysteme (NASS). Eine Bilanzierung von Nährstoffen, Energieverbrauch und CO₂-Emissionen. Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KA-1.6*, Korrespondenz Abwasser, Abfall 64 (12), 1074-1083.
- FEHRENBACH H., REINHARDT J. (2010): *Ökologische Bewertung thermischer Klärschlammbehandlungs-varianten*; In: Klärschlammfäulung und –verbrennung. Das Behandlungskonzept der Zukunft? – Ergebnisse einer Grundsatzstudie der Städte Augsburg, Frankfurt am Main, Karlsruhe, Mannheim, München, Stuttgart und Zürich; Schriftenreihe WAR 204; Darmstadt.
- HENZE, M., GUJER, W., MINO, T. et al. (2000): *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, IWA Scientific and Technical Reports 9, 99-121.
- HISSL, H. UND HILLENBRAND, T., FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI (Hrsg) (2010): *Dezentrales urbanes Infrastruktursystem DEUS 21*, Abschlussbericht.
- HORN, J. VON, MAURER, M., LONDONG, J. et al. (2013). *Welche neuartigen Sanitärsysteme (NASS) sind für Deutschland besonders Erfolg versprechend?* Korrespondenz Abwasser Abfall 60 (8), 673–683.
- IFAK E.V. (2018): *Simba Portal - software for simulation and control*, abgerufen von <https://simba.ifak.eu/en>
- IWA, GIZ, ICRA (2017): *ECAM 2.0. Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring Tool*, abgerufen am 20. Juni 2018, von <http://wacclim.org/ecam-tool/>
- KRAUS, F., ZAMZOW, M., CONZELMANN, L., REMY, C., KLEYBÖCKER, A., SEIS, W., MIEHE, U., HERMANN, L., HERMANN, R., KABBE, C. (2019). *Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung*. Verfügbar online unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-19_texte_13-2019_phorwaerts.pdf
- KWB (2012) – KOMPETENZZENTRUMWASSERBERLIN (2012): *SCST – Sanitation Concepts for Separate Treatment*, abgerufen am 23. September 2012, VON <http://www.kompetenz-wasser.de/SCST.22.0.html?&L=%3FL%3D2>
- METZGER, S., TJOENG, I.O., RÖBLER, A., SCHWENTNER, G., RÖLLE, R. (2014): *Kosten der Pulveraktivkohleanwendung zur Spurenstoffelimination am Beispiel ausgeführter und in Bau befindlicher Anlagen*, *Kommunikation Abwasser*, 11/2014, S. 1029
- OGUREK, M., ALEX, J., SCHÜTZE, M. (2015): *Eine neue Simulationsplattform für die gemeinsame Simulation von Verfahrenstechnik und MSR-Maßnahmen für abwassertechnische Anlagen*, DWA-GMA Gemeinschaftstagung „Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen“, Kassel, 09./10.06.2015.
- ORMANDZHIEVA, Z., SCHÜTZE, M., ALEX, J. (2014): *Modelling and simulation of new sanitation concepts*, 13th International Conference on Urban Drainage, Surawak, Malaysia, 7.-12.09.

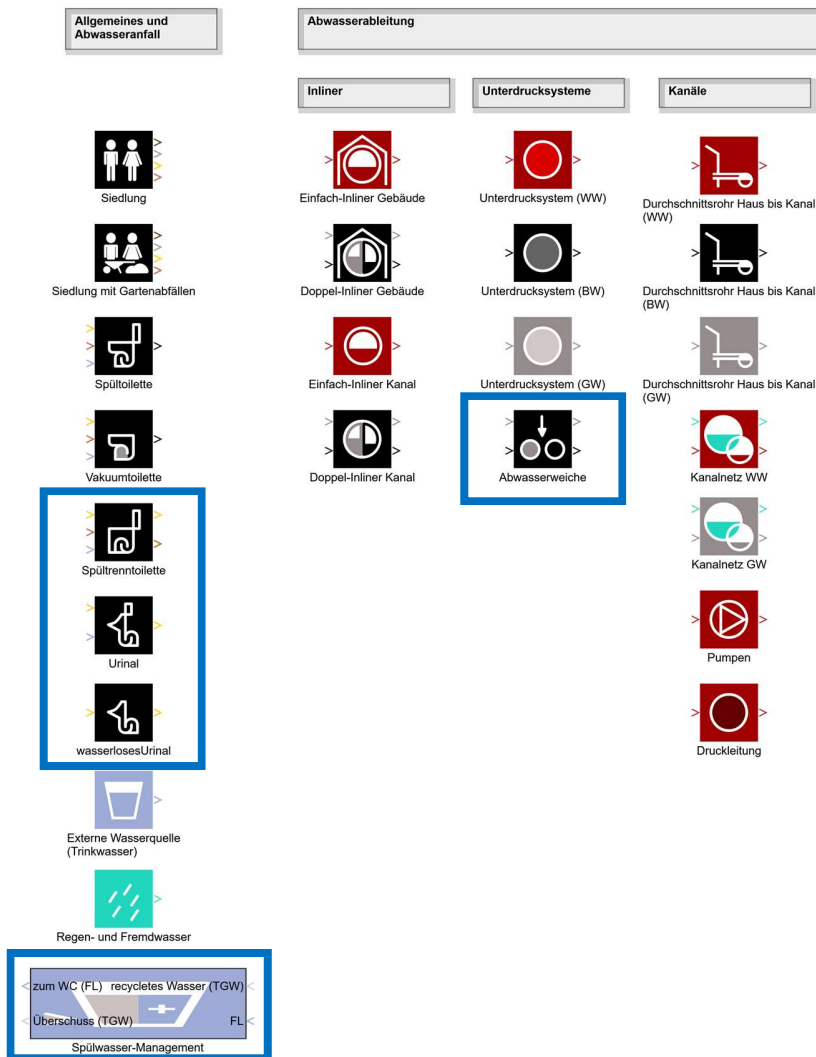
2014.

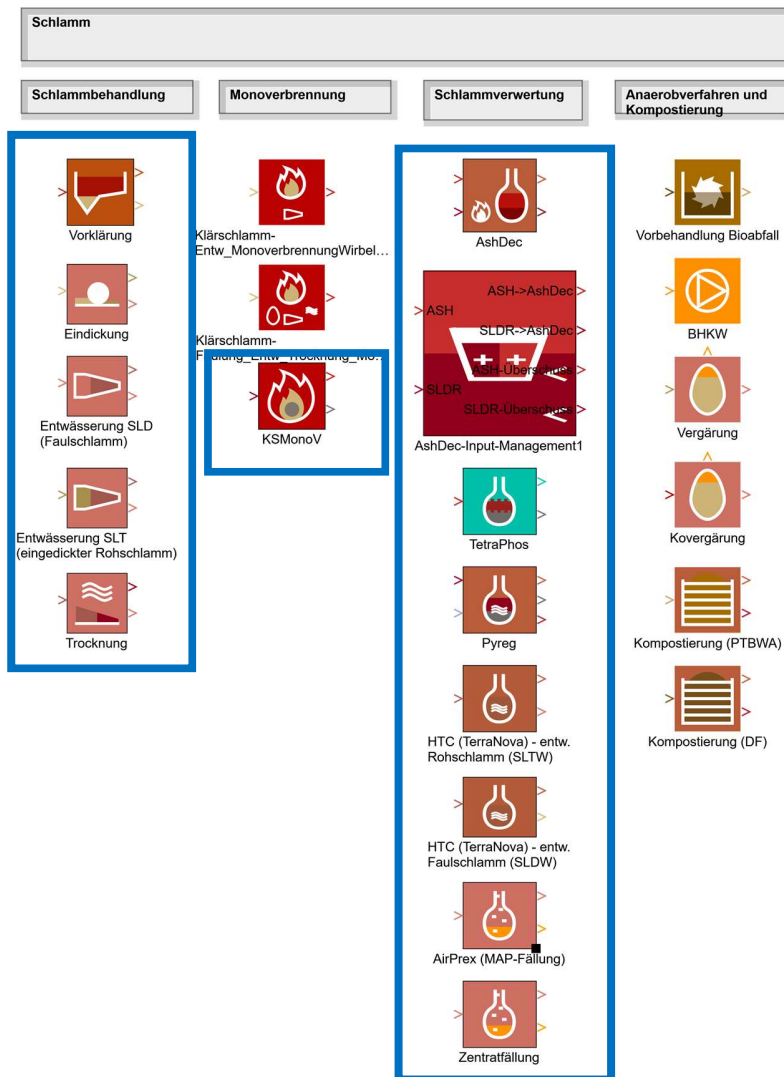
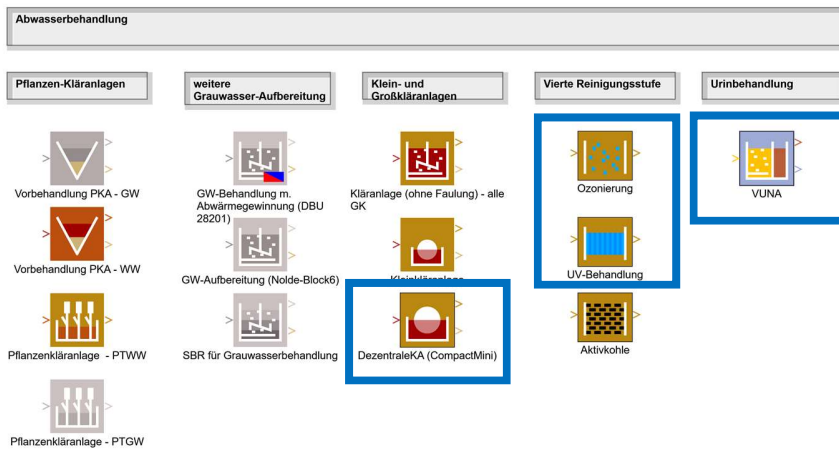
- OTTERWASSER (2007): *Final cost calculation report for the demonstration project "Sanitation Concepts for Separate Treatment of Urine, Faeces and Greywater"*, abgerufen am 02. Februar 2019, von https://www.kompetenz-wasser.de/wp-content/uploads/2017/05/scst_cost_calculation_report.pdf
- Patyk, Andreas; Reinhardt, Guido A. (1999): *Düngemittel — Energie- und Stoffstrombilanzen*. Braunschweig/Wiesbaden, Germany: Vieweg Verlag.
- REMY, C. (2010): *Life Cycle Assessment of conventional and source-separation systems for urban wastewater management*, Dissertation TU Berlin.
- REMY, C., RUHLAND, A. (2006): *Ecological Assessment of alternative sanitation concepts with Life Cycle Assessment*, Final report of subtask 5 of the demonstration project "Sanitation Concepts for Separate Treatment of Urine, Faeces and Greywater (SCST)", Berlin.
- SARTORIUS, C., NYGA, I., LEVAI, P. et al. (2017): *Entwicklung und Anwendung einer multikriteriellen Methode zur Nachhaltigkeitsbewertung von Wasserinfrastruktursystemen*, Wasserinfrastrukturen für die zukunftsfähige Stadt - Beiträge aus der INIS-Forschung, 146–151.
- SCHULZ, M., SHORT, M.D., PETERS G.M. (2012): *A streamlined sustainability assessment tool for improved decision-making in the urban water industry*, Integrated Environmental Assessment and Management 8 (1): 183–193.
- SÖBKE, H., HOFMANN, A. F., KROPP, I. et al. (2018): *Software-TWISTing. Integrierte Systeme für die Planung zukunftsfähiger kommunaler Wasserinfrastruktur*, Korrespondenz Abwasser, Abfall, 65(1), 39–45.
- STEINHÄUER, L. (2018): *Nachhaltigkeitsbewertung von Abwasserinfrastruktur mit Hilfe eines Software-Moduls am Beispiel einer ländlichen Gemeinde Thüringens*. Studienarbeit Bauhaus-Universität Weimar.
- THINKSTEP (2017): *Software System und Datenbank zur Ganzheitlichen Bilanzierung*, Stuttgart, Echterdingen.
- TILLEY, E., ULRICH, L.; LÜTHI, C., et al. (2014): *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*, 2. Auflage, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (EAWAG), Dübendorf, Schweiz.
- TÜRK, J., et al. (2013): *Schlussbericht Nährstoffgewinnung und Elimination von Spurenstoffen bei der thermokatalytischen Herstellung von Biokohle (NEST-HTC)*. Verfügbar online, abgerufen am 24.06.2020: https://www.iuta.de/igf-docs/schlussbericht_nest-htc_final.pdf
- ZINATI, T. (2021(IN PUBLICATION)): *Resource recovery of source separated sanitation compared to conventional system for sustainable urban wastewater management*. Ph.D. Technical University of Berlin, Urban Water Management Department, Berlin, Germany.

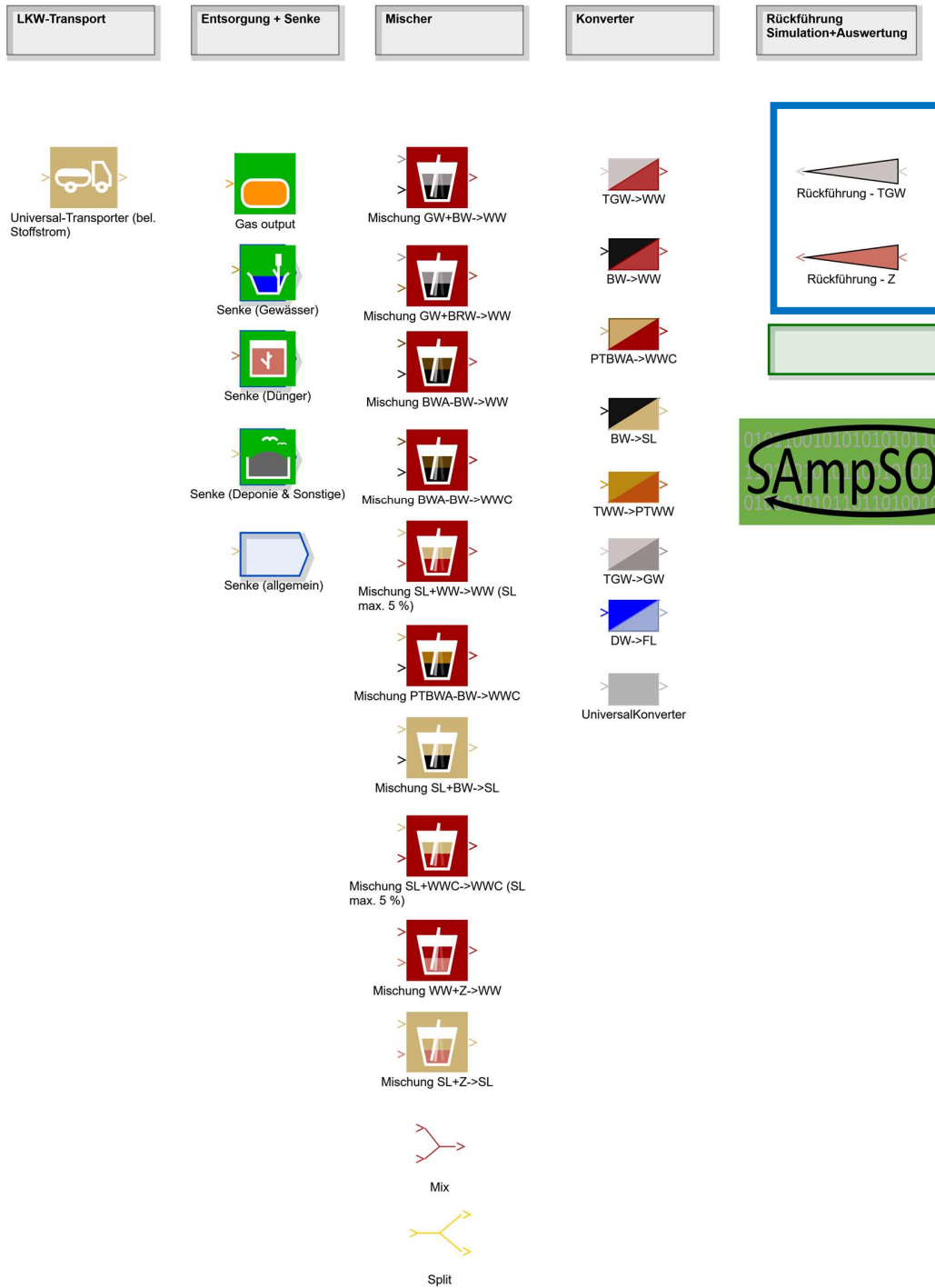
Anhang

A Modulbibliothek in SAmPSONS

N.B. Die in Phase 2 neu erstellten Blöcke sind blau markiert. Sämtliche Blöcke aus Phase 1 sind überarbeitet und erweitert worden.







B Parameter zur Berechnung von Umweltwirkungen

		EP	GHG	PE
		Eutrophication potential	Greenhouse gas emissions	Primary Energy demand
		kg PO4-eq	kg CO2-eq	MJ
PO4_direm	kg	1	0	0
N_direm	kg	0,42	0	0
NH3_direm	kg	0,35	0	0
NOX_direm	kg	0,2	0	0
NO3_direm	kg	0,1	0	0
P_direm	kg	3,06	0	0
COD_direm	kg	0,022	0	0
CO2_direm	kg	0	1	0
CH4_direm	kg	0	28	0
N2O_direm	kg	0,27	265	0
SO2_direm	kg	0	0	0
Energy	kWh	0,000146	0,614	11,1
Steel	kg	0,002153846	8,5	138,8461538
Steel2	kg	0,00036	2,44	25,1
Concrete	kg	0,000023	0,1	0,47
ReenforcedConcrete	kg	0,0000334	0,137	0,88
PP	kg	0,0012	1,63	77,8
HDPE	kg	0,0012	1,8	80,1
PVC	kg	0,0013	2,56	70,8
Castiron	kg	0,00057	3,87	52
Sandgravel	kg	0,00000232	0,0023	0,0407
Lorry_22	tkm	0,000029	0,05729	0,82
Lorry_11	tkm	0,0000407	0,0701	1
Car	100 km	0,01086	15,16	215
Aluminium	kg	0,00241	9,68	172
Diesel	l	0,002131019	2,974792453	42,18867925
Epoxidresin	kg	0,00144	6,22	131
Polyester	kg	0,0013	6,69	145
Water	kg	0,000000209	0,000423	0,00276

Plants	piece	4,31E-11	4,08E-08	0,000000658
Glass	kg	0,000926	1,13	14,8
Limestone	kg	0,0000876	0,0135	0,229
Glassfibre	kg	0,000634	1,77	29,2
Copper	kg	0,00172	3,73	59,3
SoilExcavated	kg	1,63711E-07	0,000228532	0,003241057
Thermalenergy	kWh	0,0000244	0,24	3,89
Stoneware	kg	8,28431E-05	0,532156863	8,928235294
Rubber	kg	0,000568	3,29	94,3
Precipitationagent	kg	2,81E-04	0,8	9,00
Flocculationagent	kg	-1	-1	-1
Carbon	kg	0,00131	4,98	110
Na2CO3	kg	0,00139	1,46	17,5
ConstructionSteel	kg	0,00053	2,29	23,5
HCl	kg	0,000137	0,4	8,4
Na2S	kg	0,000635	2,34	40,9
H2SO4	kg	0,000053	0,26	12
Quartzglass	kg	0,00143	2,04	37,4
Oxygen	kg	0,000097	0,39	7,8
Cu2O	kg	0,00026	1,36	8,3
MgO	kg	0,00026	1,36	8,3
Quartzsand	kg	0,000063	0,26	4,9
Hazardouswaste	kg	0,000255	1,11	4
NaOH	kg	0,00021	0,59	11
NH3	kg	0,00087	2,52	38,4
PAC	kg	0,00131	4,98	110
GAC	kg	0,00131	4,98	110
Firebrick	kg	0,00000266	0,00116	0,0168
FlocculationagentDewat	kg	0,00034638	2,2	63
MgCl	kg	0,000442	1,75	22,1
CeramicFibre	kg	7,30E-04	1,17	15,4
EP	kg	1	0	0
GHG	kg	0	1	0
PE	MJ	0	0	1
EnergyEnd	kWh	0,000146	0,614	11,1

C Muster Daten-Steckbrief

Daten-Steckbrief Verfahrensblock (allgemeingültig)						
Verfasser des Steckbriefs:						
Organisation:						
Kontakt details:						
Mit Veröffentlichung einverstanden?						
Status/Aufgaben:						
Bitte zusätzliche Zeilen einfügen, wenn erforderlich; Bitte auch noch fehlende Datenbedarfe kenntlich machen Bitte Veränderungshistorie pflegen						
Thema	Information	Beschreibung	Wert	Einheit	Referenz/ Datenquelle	Kommentar
Verfahrensname		z.B. Biogasanlage: zweistufige anaerobe Fermentation				
Kurzname		z.B. Biogasanlage				
Verfahrensbeschreibung		Beschreibung des Verfahrens inkl. Prozessfließbild				
Verfahrensbeschreibung (kurz)						
Icon		wenn vorhanden				
Kapazität		von-bis		z.B.: kg/a, m3/a, EW		Bitte auch spezifische Angaben zur Mindestkapazität bzw. zur Skalierung der Anlage machen.
Lebensdauer				Jahre		evtl. separiert nach unterschiedlichen Lebensdauern für einzelne Anlagenteile
Dimension bzw. Platzbedarf				z. B. m2/(kg/a), m2/(m3/a), m2/EW		
Input - Stoffströme	Stoffstrom 1	z.B. Grauwasser				
	Stoffstrom 2	z.B. Schwarzwasser				
	Stoffstrom 3	z.B. Urin				
	Stoffstrom 4	z.B. Bioabfall				
	Stoffstrom n					
	Energiestrom 1	Betriebsenergie (Strom)				
	Energiestrom 2	Betriebsenergie (Wärme)				
	Energiestrom n					
Output - Stoffströme	Stoffstrom 1	z.B. Schwarzwasser				
	Stoffstrom 2	z.B. Grauwasser				
	Stoffstrom 3	z.B. Biogas				
	Stoffstrom 4					
	Stoffstrom n					
	Energiestrom 1	z.B. Wärme				z.B. aus Wärmerückgewinnung
	Energiestrom 2	z.B. Strom				
	Energiestrom n					
Bilanzen und Leistungsdaten, e.g. Reinigungseffizienz						
	N-Bilanz (bezogen auf die Input-Menge)	N in Output 1		%		
		N in Output 2		%		
	P-Bilanz (bezogen auf die Input-Menge)	P in Output 1		%		
		P in Output 2		%		
	K-Bilanz (bezogen auf die Input-Menge)	K in Output 1		%		
		K in Output 2		%		
	S-Bilanz (bezogen auf die Input-Menge)	S in Output 1		%		
		S in Output 2		%		
	CSB-Bilanz (bezogen auf die Input-Menge)	CSB in Output 1		%		
		CSB in Output 2		%		

Abschlussbericht SAmPSONS (Phase 1 und 2)

	oTS-Bilanz (bezogen auf die Input-Menge)	oTS in Output 1		%		
		oTS in Output 2		%		
	TSS-Bilanz (bezogen auf die Input-Menge)	TSS in Output 1		%		
		TSS in Output 2		%		
	Diclofenac-Bilanz (bezogen auf die Input-Menge)	Diclofenac in Output 1		%		
		Diclofenac in Output 2		%		
	Benzotriazol-Bilanz (bezogen auf die Input-Menge)	Benzotriazol in Output 1		%		
		Benzotriazol in Output 2		%		
	lomeprol-Bilanz (bezogen auf die Input-Menge)	lomeprol in Output 1		%		
		lomeprol in Output 2		%		
	Metoprolol-Bilanz (bezogen auf die Input-Menge)	Metoprolol in Output 1		%		
		Metoprolol in Output 2		%		
	Sulfamethoxazol-Bilanz (bezogen auf die Input-Menge)	Sulfamethoxazol in Output 1		%		
		Sulfamethoxazol in Output 2		%		
Einsatz Materialien, Verbrauch Grund- und Hilfsstoffe						In diesem Abschnitt sollten die Materialien und Verbrauchsstoffe inkl. der entsprechenden Menge eingetragen werden, die bekanntermaßen zu Umweltwirkungen beitragen
	Material 1	z.B. Stahl		z. B. kg/(kg/a),		
	Material 2	z.B. Kunststoff		kg/(m3/a),		
	Material 3	z.B. Beton		kg/EW		
	Material n					
	Verbrauchsmaterialien	z.B. Spülwasser		z. B. : m3/m3 input, m3/kg input, kg/m3 input, kg/kg input, m3/(EW*a), kg/(EW*a)		
	Verbrauchsmaterialien	z.B. Chemikalien zur Abwasserbehandlung				

Abschlussbericht SAMPSONS (Phase 1 und 2)

	Bezeichnung	Einheit	Einheit	Einheit	Einheit
Energieeinsatz	Energie 1	z.B. Strom		z. B. : kWh/m ³ input,	auch Angaben zu Energiebereitstellung, z.B. Strom aus Stromnetz z.B. auch Wärmeertrag
	Energie 2	z.B. Wärme		kWh/kg input,	
	Energie n			kWh/(EW*a)	
Direkte Emissionen	Emission 1	z.B. PO ₄			
	Emission 2	z.B. CH ₄			
	Emission 3	z.B. N ₂ O			
	Emission 4	z.B. CO ₂			Achtung, nur fossile CO ₂ -Emissionen
	Emission 5	z.B. NH ₃			
	Emission n				
Kosten/Erlöse - LCC	Investitionskosten			z. B. €/(kg/a),	möglichst differenziert die Kosten- /Erlösarten den entsprechenden Kosten- /Erlösträgern zuordnen; zusätzlich Zeitpunkt/-spannen für anfallende Kosten angeben
	Planungs- /Einbaukosten			€/m ³ /a), €/EW	
	Wartungs- /Instandhaltungskosten				
	Betriebskosten			z. B. €/kg, €/m ³ , €/EW*a)	
	Erlöse			€	
Kommentare, Annahmen, etc.:					

D Daten-Steckbriefe

Die Daten-Steckbriefe enthalten Parameter für die einzelnen in SAmpSONS abgebildeten Erfassungs-, Transport- und Behandlungstechnologien/-verfahren, mit denen beim Fehlen eigener Daten die Simulation von Abwasserinfrastruktursystemen durchgeführt werden kann. Die Daten-Steckbriefe sind separat in einer MS Excel-Datei hinterlegt. Bei den Einzelwerten existieren z.T. große Schwankungsbreiten. Die Werte wurden vom Projektteam nach bestem Wissen und Gewissen zusammengestellt. Jedem Wert wurde eine Datenqualitätskategorie (siehe Abbildung 2) zugeordnet. Alle Werte wurden ausschließlich für die Nutzung in SAmpSONS zusammengestellt. Es gilt grundsätzlich, dass Werte nicht aus dem Zusammenhang gerissen genutzt werden sollten. Beispielsweise sind abgeschätzte Werte mit gebührender Achtsamkeit zu behandeln. Diese sind aus subjektiven Erfahrungen und Herangehensweisen des Projektteams entstanden. Anhand von Referenzen und Kommentaren ist die Datenherkunft und/oder Herangehensweise dokumentiert worden. Für weitere Hinweise siehe Abschnitt 3.1: Technologien und Behandlungsverfahren/Beschreibung der SAmpSONS-Verfahren.