



Online Modeling, Simulation and Remote Control System for Environmental Technologies on board (Cruise) Ships (OSCAR)

Abschlussbericht des Institutes für
Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der
Leibniz Universität Hannover

**Teilprojekt: Modellbasierte Simulation (digitaler Zwilling)
und Ableitung von Prognosen zur Unterstützung des
Betriebs von Umwelttechnologien an Bord von
(Kreuzfahrt-)Schiffen**

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Stephan Köster
Projektbearbeitung: Dagmar Pohl, M. Sc.

Förderkennzeichen: 03SX486C

Laufzeit: 01.07.2019 - 31.12.2022

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zitiervorschlag für den vorliegenden Abschlussbericht des ISAH:

KÖSTER, Stephan ; POHL, Dagmar: *Abschlussbericht des BMWK-Forschungsprojektes Online Modeling, Simulation and Remote Control System for Environmental Technologies on board (Cruise) Ships - OSCAR, FKZ 03SX486C - Modellbasierte Simulation (digitaler Zwilling) und Ableitung von Prognosen zur Unterstützung des Betriebs von Umwelttechnologien an Bord von (Kreuzfahrt-)Schiffen*. Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Leibniz Universität Hannover, 2023

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 03SX486C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Informationen zum Gesamtprojekt

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Verbundvorhaben „Online Modeling, Simulation and Remote Control System for Environmental Technologies on board (Cruise) Ships“ (OSCAR) wurde vom 01. Juli 2019 bis 31. Dezember 2022 von folgenden Projektpartnern bearbeitet:

Abkürzung	Universitäre Partner
ISAH	Institut für Siedlungswasserwirtschaft & Abfalltechnik (ISAH) der Leibniz Universität Hannover
	Industriepartner
CMG	Carnival Maritime GmbH
SEGNO	SEGNO Industrie Automation GmbH

Aufgabenstellung

Ziel des Projektes OSCAR war es, ein cloudgestütztes Remote-Prozessleitsystem (PLS) für umwelttechnische Prozesse zu entwickeln, das, insbesondere unterstützt durch digitale Zwillinge, einen zuverlässigen und effizienten Anlagenbetrieb fördert sowie das Betriebspersonal an Bord unterstützt. Der Projektfokus lag dabei auf der Behandlung von Abwasser und organischen Reststoffen.

Konkret sollten durch die in OSCAR entwickelten Lösungen bedarfsgerechte Eingriffe in den Betrieb sowie optimale Betriebsstrategien auf der Grundlage einer sensorbasierten Datenerfassung, Prozessmodellierung sowie darauf aufbauender Betriebszustandsprognosen ermöglicht werden. Zusätzlich wurde ein landseitiges zentrales Flottenmanagement mittels Anlagenfernüberwachung und -steuerung angestrebt.

Das Projekt unterteilte sich in folgende Arbeitspakete (AP):

- **AP 1: Erfassung der Ist-Situation an Bord von Kreuzfahrtschiffen (CMG, ISAH)**
- **AP 2: Einrichtung PLS-Infrastruktur und Entwicklung des Prozessleitsystems (SEGNO)**
- **AP 3: Aufbau und Erprobung Digitaler Zwilling (ISAH)**
- **AP 4: Entwicklung von verfahrensspezifischen Kontroll- und Betriebsstrategien (ISAH)**
- **AP 5: Erprobung des „smarten“ Prozessleitsystems (CMG, SEGNO, ISAH)**

Das vorliegende Dokument enthält die detaillierte Darstellung der Zielsetzungen und Ergebnisse des am ISAH bearbeiteten Vorhabens *Modellbasierte Simulation (digitaler Zwilling) und Ableitung von Prognosen zur Unterstützung des Betriebs von Umwelttechnologien an Bord von (Kreuzfahrt-)Schiffen*. Weitere Ergebnisse des Projektes sind den Berichten der Projektpartner CMG und SEGNO zu entnehmen.

Inhaltsverzeichnis

Bildverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
1 Ausgangssituation, Zielsetzung und Vorgehen	1
2 Ansatzpunkte für die Betriebsunterstützung und -optimierung	3
2.1 Analyse der Ist-Situation.....	3
2.1.1 Abwasser- und organische Reststoffbehandlung an Bord	4
2.1.2 Charakterisierung der Stoffströme und der Zulaufdynamik	5
2.2 Ansatzpunkt Zulaufbewirtschaftung	11
2.2.1 Ziele und Ansatzpunkte für das Zulaufmanagement	12
2.2.2 Voraussetzungen und Anforderungen für die Umsetzung	15
2.3 Ansatzpunkt Kläranlagenbetrieb	16
2.3.1 Betriebsstrategien für die biologische Stufe	16
2.3.2 Voraussetzungen und Anforderungen für die Umsetzung	19
3 Elemente des OSCAR-PLS	21
3.1 Zusammenführung und Aufbereitung von Daten und Informationen zum Prozess- und Anlagenzustand	21
3.2 Modellierungskonzept für die digitalen Zwillinge	24
3.2.1 Modellierung der biologischen Stufe	25
3.2.2 Modellierung des Kläranlagenzulaufs	27
3.3 Modellkalibrierung	28
3.4 Modellbasiertes Prozessmonitoring	34
3.5 Prognoserechnungen	43
3.6 Weitere Anwendungsmöglichkeiten für die Simulationsmodelle	48
3.6.1 Schulung des Betriebspersonals	49
3.6.2 Entwicklung und Optimierung von Betriebs- und Regelungsstrategien	49
3.6.3 Planung von Anlagenum- und -neubauten	50
3.6.4 Weiterentwicklung der Abwasser- und organischen Reststoffbehandlung	51
3.7 Umsetzungshinweise	51
4 Zusammenfassung und Ausblick	54
Anhang A Charakterisierung der Abwasserteilströme	59
A.1 Datengrundlage	59
A.1.1 Daten aus Messkampagnen an Bord	59
A.1.2 Aufgezeichnete Tankfüllstände	59
A.1.3 Wäschereiprotokolle	59
A.1.4 Informationen zu Betriebsabläufen und technische Daten der abwassererzeugenden Geräte und Einrichtungen.....	61
A.1.5 Permeatmengen.....	61

A.1.6 Anzahl der Passagiere und Crew sowie Liegezeiten	61
A.2 Teilstromcharakterisierung	61
A.2.1 Schwarzwasser	64
A.2.2 Kabinengrauwasser.....	67
A.2.3 Küchenabwasser.....	68
A.2.4 Wäschereiabwasser	70
A.2.5 Presswasser aus der Speiserestentwässerung	72
A.2.6 Zentrat aus der Überschussschlamm- und Siebrückstandsentswässerung	73
A.2.7 Brüdenkondensat aus der Trocknung	74
Anhang B Modellierungsansätze	76
B.1 Zulaufprognosemodell.....	76
B.1.1 Modellierung des Passagier- und Crewverhaltens	76
B.1.2 Schwarzwasser	77
B.1.3 Kabinengrauwasser.....	79
B.1.4 Küchenabwasser.....	81
B.1.5 Wäschereiabwasser	82
B.1.6 Abwässer aus der organischen Reststoffbehandlung	83
B.2 Schlammbilanzmodell	83
B.3 Nährstoffeliminationsmodell	85
Anhang C Versuchstechnik	88
C.1 Versuche zur Harnstoffhydrolyse in der Laborkläranlage	88
C.1.1 Anlagenbeschreibung.....	88
C.1.2 Durchgeführte Versuche.....	89
C.1.3 Ergebnisse zur Harnstoffhydrolyse	91
C.2 Erprobung an der Versuchsschiffskläranlage	91
C.2.1 Anlagenbeschreibung.....	91
C.2.2 Begleitanalytik	95
C.2.3 Anlagenbetrieb	96
Anhang D IoT-Infrastruktur	97
Literaturverzeichnis	99

Bildverzeichnis

Bild 1	Zentrale Bausteine des OSCAR-Konzeptes	1
Bild 2	Vereinfachte Übersicht der Abwasser- und organischen Reststoffbehandlung an Bord	4
Bild 3	Tagesverlauf des Abwasseranfalls an einem Seetag.....	7
Bild 4	Tagesverlauf der anfallenden CSB-Fracht an einem Seetag	8
Bild 5	Tagesverlauf der anfallenden TN-Fracht an einem Seetag	8
Bild 6	Tagesverlauf der anfallenden TP-Fracht an einem Seetag	8
Bild 7	Screenshot eines Ausschnittes des Speichertankmodells	10
Bild 8	Tagesverlauf der CSB-Fracht im Kläranlagenzulauf unter Berücksichtigung der Abwasserspeicherung.....	10
Bild 9	Tagesverlauf der TN-Fracht im Kläranlagenzulauf unter Berücksichtigung der Abwasserspeicherung.....	10
Bild 10	Tagesverlauf der TP-Fracht im Kläranlagenzulauf unter Berücksichtigung der Abwasserspeicherung.....	11
Bild 11	Screenshot der Zeitreihendarstellung von Messwerten in der Siemens Mindsphere (oben) und in Grafana (unten).....	23
Bild 12	Übersicht der verwendeten Modellierungsansätze	25
Bild 13	Mit den a-priori-Verteilungen der Parameter des Schlamm Bilanzmodells berechnete sowie gemessene TS-Konzentrationen im Referenzzeitraum.....	31
Bild 14	Berechnete Minimal-, Median- und Maximalwerte der TS-Konzentration in Abhängigkeit der Parameterwerte des Schlamm Bilanzmodells für den Kalibrierzeitraum.....	31
Bild 15	Cornerplot der Wahrscheinlichkeitsdichten der Kalibrierungsparameter des Schlamm Bilanzmodells	33
Bild 16	Berechnete sowie gemessene TS-Konzentrationen im Referenz- und Validierungszeitraum	34
Bild 17	Schematische Darstellung des Vorgehens zur Abbildung und Prognose des Anlagenzustands mit dem digitalen Zwilling	36
Bild 18	Vergleich von berechneten Erwartungswerten und Messwerten der TS-Konzentration inkl. Unsicherheit.....	39
Bild 19	Vergleich von berechneten Erwartungswerten und Messwerten der TS-Konzentration inkl. Unsicherheit.....	40
Bild 20	Screenshot des Beobachtermodells (Nährstoffeliminationsmodell) der im Technikum betriebenen Schiffskläranlage inkl. Abwassermisch- und -dosierstation	41
Bild 21	Beispielergbnis für eine Prognoserechnung mit dem Schlamm Bilanzmodell	46
Bild 22	Eingangsdaten der in Bild 21 dargestellten Prognoserechnung	47
Bild 23	Einfluss der variierten Modellparameter und Eingangsdaten auf Minimum, Median und Maximum der TS-Konzentration (hier: TSS) und des Schlammalters (SRT) für die in Bild 21 gezeigte Prognoserechnung	48
Bild 24	Schematische Darstellung der Möglichkeiten zur Einbettung der digitalen Zwillinge in die IoT-Infrastruktur	52
Bild 25	Beispiel für einen Screenshot der aufgezeichneten Tankfüllstände.....	60

Bild 26	Gemessene Konzentrationen und Konzentrationsverhältnisse von Schwarzwasser, Küchenabwasser, Küchenabwasser nach Fettabscheider (FA), Wäschereiabwasser und Kabinengrauwasser	62
Bild 27	Weitere Messwerte von Schwarzwasser, Küchenabwasser, Küchenabwasser nach Fettabscheider (FA), Wäschereiabwasser und Kabinengrauwasser	63
Bild 28	Daten zum personenspezifischen Schwarzwasseranfall (in L/(Pd))	64
Bild 29	Berechnete Tagesverläufe des Anfalls (oben) sowie der TN-Fracht (Mitte) und CSB-Fracht (unten) des Schwarzwassers	66
Bild 30	Berechneter Verlauf der CSB- und TN-Konzentration des Schwarzwassers	66
Bild 31	Daten zum personenspezifischen Kabinengrauwasseranfall (in L/(Pd))	67
Bild 32	Tagesgang des Kabinengrauwasseranfalls während einer Karibik-Kreuzfahrt	68
Bild 33	Daten zum personenspezifischen Küchenabwasseranfall (in L/(Pd))	69
Bild 34	Küchenabwasseranfall pro Gedeck (in L/Gedeck)	69
Bild 35	Tagesgang des Küchenabwasseranfalls (inkl. vernachlässigbar geringer Mengen Speiserestpresswasser) während einer Karibik-Kreuzfahrt	70
Bild 36	Daten zum personenspezifischen Wäschereiabwasseranfall	71
Bild 37	Tagesgang des Wäschereiabwasseranfalls an Wechseltagen sowie jeweils einen Tag davor und danach	72
Bild 38	Mit dem Zulaufprognosemodell berechneter Verlauf des Kabinengrauabwasseranfalls	81
Bild 39	Mit dem Zulaufprognosemodell berechneter Tagesverlauf des Küchenabwasseranfalls	82
Bild 40	Foto und Fließbild eines Reaktors der Laborkläranlage	88
Bild 41	Gemessene Harnstoffhydrolyseraten in Abhängigkeit der Harnstoffkonzentration...	91
Bild 42	Foto der Versuchsschiffskläranlage im Technikum des ISAH	92
Bild 43	Fotos der zur Beschickung der Schiffskläranlage genutzten Abwassermisch- und Dosierstation.....	92
Bild 44	Fließschema der Versuchsschiffskläranlage und der Abwassermisch- und -dosierstation	93
Bild 45	Screenshot der Benutzeroberfläche der am ISAH programmierten Steuerung der Abwassermisch- und -dosierstation.....	95
Bild 46	Schematische Übersicht der an der Versuchsschiffskläranlage implementierten IoT-Infrastruktur	97

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Abwasserteilströme an Bord	6
Tabelle 2	Zur Berechnung eines typischen Tagesganges zugrunde gelegten Daten	7
Tabelle 3	Für die Kalibrierung des Schlamm Bilanzmodells festgelegte a-priori- Verteilungen der Parameterwerte.....	30
Tabelle 4	Informationen zu beprobten Schiffen und Messkampagnen.....	60
Tabelle 5	Zusammensetzung von Speiserestpresswässern.....	73
Tabelle 6	Abschätzung des personenspezifischen Zentratanfalls aus der Entwässerung von Überschussschlamm und Siebrückständen	74
Tabelle 7	Für die Beispielrechnung genutzte Aufsteh- und Schlafenszeiten für See-, Hafen- und Wechseltage	77
Tabelle 8	Anteil der Personen und Parameter der zeitlichen Verteilung von Landgängen, Ein- und Ausschiffen für die Beispielrechnung.....	77
Tabelle 9	Zusammensetzung der verschiedenen Typen von Spülvorgängen	77
Tabelle 10	Typische und abgeschätzte Werte für die Menge und Zusammensetzung von Urin, Fäzes, Toilettenpapier und Spülwasser	78
Tabelle 11	Typische personenspezifische Abwassermengen der dem Kabinengrauwasseranfall zugrundeliegenden Aktivitäten	79
Tabelle 12	Modellparameter für die Verteilung des Duschabwasseranfalls	80
Tabelle 13	Modellparameter für den Tagesgang des Küchenabwasseranfalls	82
Tabelle 14	Typische Wertebereiche der Modellparameter des Schlamm Bilanzmodells	85
Tabelle 15	Standardwerte für den Stickstoffgehalt der CSB-Fraktionen im Modell asm3h (nach Koch et al., 2000).....	86
Tabelle 16	Typische Stickstoff- und CSB-Konzentrationen sowie resultierendes Verhältnis von N:CSB in Schiffsabwasserteilströmen.....	86
Tabelle 17	Messtechnische Ausstattung der Laborkläranlage.....	89
Tabelle 18	Rezepte für synthetisches Schiffsabwasser	90
Tabelle 19	In der Versuchsschiffskläranlage verbaute Online-Messtechnik und erfasste Messwerte	94
Tabelle 20	Im Rahmen der wöchentlichen Zusatzanalytik bestimmte Parameter (Labormessungen).....	96

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
API	Programmierschnittstelle (engl. <i>Application Programming Interface</i>)
ASM	Belebtschlammmodell (engl. <i>Activated Sludge Model</i>)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CMG	Carnival Maritime GmbH
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DO	Gelöstsauerstoff (engl. <i>dissolved oxygen</i>)
IoT	Internet of Things
ISAH	Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Leibniz Universität Hannover
ISE	Ionenselektive Elektrode
KN	Kjeldahl-Stickstoff
MBR	Membranbioreaktor
NH₄-N	Ammonium-Stickstoff
NO₃-N	Nitrat-Stickstoff
oTS	organische Trockensubstanz
Pax	Passagierzahl
PLS	Prozessleitsystem
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TOC	gesamter organischer Kohlenstoff (engl. <i>total organic carbon</i>)
TN	Gesamtstickstoff (engl. <i>total nitrogen</i>)
TP	Gesamtphosphor (engl. <i>total phosphorus</i>)
TS	Trockensubstanz
US EPA	United States Environmental Protection Agency

Im Bericht verwendete Formelzeichen sind im jeweiligen Kapitel erläutert und aufgeführt.

1 Ausgangssituation, Zielsetzung und Vorgehen

Die Verschärfung umwelttechnischer Anforderungen im maritimen Bereich erfordert den Einsatz zusätzlicher Technologien sowie eine bessere Ausnutzung der Leistungsfähigkeit vorhandener Anlagen an Bord von (Kreuzfahrt-)Schiffen. Der Betrieb der vielfältigen und zunehmend komplexen umwelttechnischen Prozesse stellt hohe Anforderungen an das Betriebspersonal. Ziel des Forschungs- und Entwicklungsprojektes OSCAR war es, einen zuverlässigen und effizienten Anlagenbetrieb zu fördern sowie das Betriebspersonal an Bord durch die Entwicklung eines cloudgestützten Remote-Prozessleitsystems (OSCAR-PLS) für umwelttechnische Prozesse – insbesondere unterstützt durch digitale Zwillinge – zu unterstützen. Der Projektfokus lag dabei auf der Behandlung von Abwasser und organischen Reststoffen. Der in OSCAR verfolgte Ansatz ist in Bild 1 dargestellt und wird im Folgenden näher erläutert.

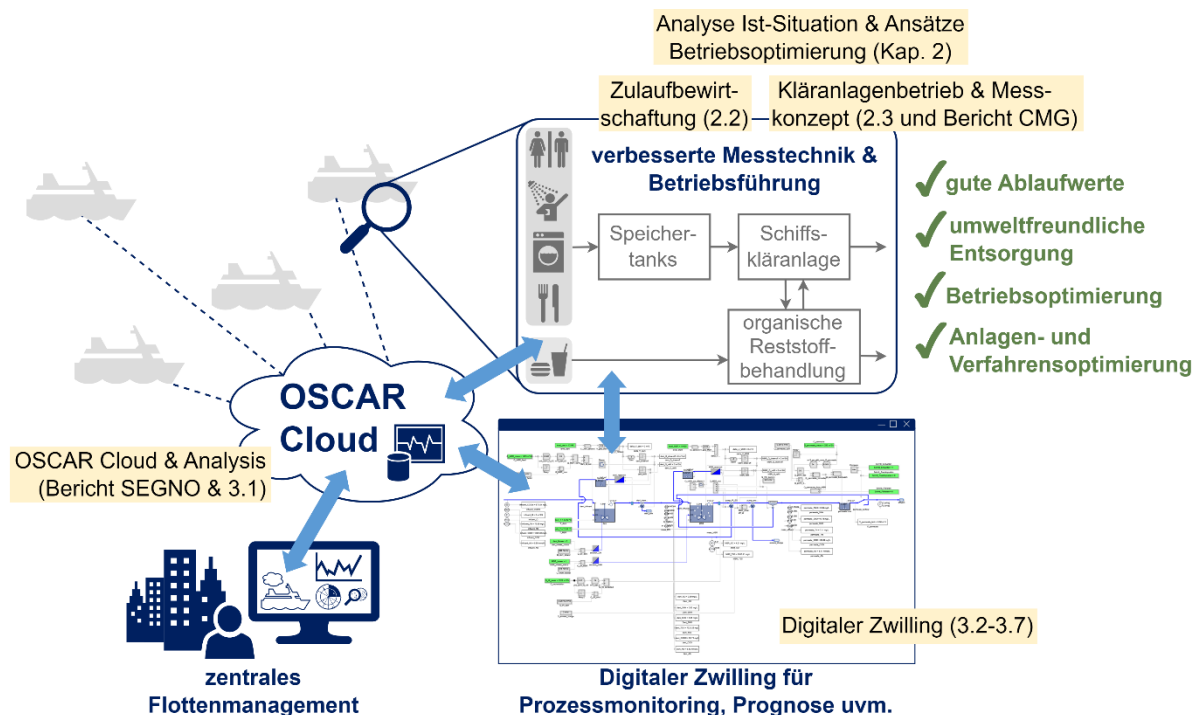


Bild 1 Zentrale Bausteine des OSCAR-Konzeptes mit Verweis auf die jeweiligen Berichtsteile (gelb hinterlegt)

Wesentliche Elemente der in OSCAR angestrebten Betriebsunterstützung und -optimierung sind:

- die Verbesserung des Prozessmonitorings durch die Zusammenführung, Aufbereitung und leicht zugängliche Bereitstellung relevanter Daten zum Prozess- und Anlagenzustand
- die betriebsbegleitende Simulation mit digitalen Zwillingen:
 - zur Bereitstellung zusätzlicher Informationen zur Betriebsüberwachung
 - zur Erkennung von Störungen und Analyse möglicher Ursachen
 - zur Erstellung von Prognosen für die Unterstützung des vorausschauenden Anlagenbetriebes sowie frühzeitige Erkennung sich anbahnender unerwünschter Betriebszustände

Die Crews an Bord der verschiedenen Schiffe der Flotte sollen durch Verfahrensspezialisten an Land unterstützt werden (zentrales Flottenmanagement). Ermöglicht werden soll dies durch die Übertragung der relevanten Anlagendaten der Schiffe in die OSCAR-Cloud, wodurch der Zugriff auf die Anlagenda-

ten und ggf. eine Fernsteuerung der Anlagen von Land aus ermöglicht wird. Die in der Zentrale zusammenfließenden Daten und Informationen zum Zustand der Anlagen können zudem genutzt werden, um zielgerichtete Optimierungen des Betriebes und der Anlageninfrastruktur anzustoßen.

Das im vorliegenden Bericht dargestellte Teilvorhaben des ISAH umfasste die folgenden Arbeiten:

- 1) Analyse der Ist-Situation und Ableitung wesentlicher Ansatzpunkte für die Betriebsunterstützung und -optimierung
 - Übersicht der Behandlungsprozesse, betrieblichen Abläufe und aktuell erfassten Daten (Abschnitt 2.1.1)
 - Charakterisierung des Anfalls und der Zusammensetzung der Abwasserteilströme an Bord (Abschnitt 2.1.2)
 - Ableitung von Ansatzpunkten zur Betriebsunterstützung und Entwicklung von Betriebsstrategien zur Gewährleistung eines stabilen Reinigungsprozesses sowie zur Optimierung der Reinigungsleistung (Abschnitt 2.2: Zulaufbewirtschaftung und Abschnitt 2.3: Kläranlagenbetrieb)
- 2) Entwicklung und Erprobung von Bausteinen für das OSCAR-PLS
 - Zusammenführung, Aufbereitung und leicht zugängliche Bereitstellung relevanter Daten in einer digitalen Umgebung mit Cloudzugriff (gemeinsam mit Projektpartner SEGNO) (Abschnitt 3.1)
 - Entwicklung und Erprobung von Beobachter- und Prognosemodellen (Digitale Zwillinge) für die biologische Stufe der Schiffskläranlage und den Kläranlagenzulauf (Abschnitte 3.2 bis 3.7)

Flankiert wurden die Arbeiten des ISAH durch folgende Inhalte der Teilvorhaben der anderen Projektpartner:

- Bereitstellung von Daten und Informationen zu Anlagentechnik, Betriebsabläufen usw. und Implementierung zusätzlicher Messtechnik an Bord (CMG)
- Implementierung einer Cloud-Lösung zur Anlagenfernüberwachung und -steuerung von Land aus (SEGNO)

2 Ansatzpunkte für die Betriebsunterstützung und -optimierung

Um Randbedingungen und Ansatzpunkte für die Betriebsunterstützung und -optimierung zu identifizieren, wurden zunächst die aktuelle Betriebssituation analysiert und Mengen, Zusammensetzung und Dynamik des Reststoff- und Abwasseranfalls charakterisiert (Abschnitt 2.1).

Davon ausgehend wurden zwei wesentliche Schwerpunkte für die weiteren Arbeiten gesetzt:

- die Zulaufbewirtschaftung (Abschnitt 2.2),
- der Betrieb der biologischen Stufe der Schiffskläranlage (Abschnitt 2.3).

Die grundlegenden Konzepte und wesentliche Rahmenbedingungen für ihre Umsetzung sind in den nachfolgenden Abschnitten beschreiben.

2.1 Analyse der Ist-Situation

Um eine möglichst vollständige Datengrundlage zur aktuellen Betriebssituation an Bord zu erhalten, wurden alle verfügbaren Datenquellen kombiniert. Konkret waren dies:

- vom Projektpartner CMG bereitgestellte Betriebsdaten,
- Daten und Erkenntnisse aus den zuvor implementierten Forschungs- und Entwicklungs-Projekten CLEAN (BMW FKZ 03SX437C) und NAUTEK (BMW FKZ 03SX360A),
- Daten und Informationen aus der Literatur.

Besuche und Beprobungen an Bord konnten aufgrund der Corona-Pandemie und der damit einhergehenden Unzugänglichkeit der Schiffe nicht zum ursprünglich geplanten Zeitpunkt und im vorgesehenen Umfang durchgeführt werden. Im weiteren Projektverlauf konnten noch Daten einer Probenahme an Bord im Oktober 2022 ergänzt werden.

Kernaussagen

- Die Anwendung des **OSCAR-Konzeptes** (siehe Bild 1) stellt eine **deutliche Verbesserung gegenüber dem aktuellen Prozessmonitoring** dar und bietet mit der Bereitstellung von Prognosen zum Prozesszustand eine bisher nicht verfügbare Unterstützung des Anlagenbetriebs an Bord. Damit wird das Erzielen einer zuverlässigen und effizienten Betriebsführung vereinfacht, wodurch die Anlageneffizienz und Umweltschutzleistungen an Bord gesteigert werden können.
- Sowohl die Abwassermenge als auch die Schmutz- und Nährstofffrachten weisen einen deutlich ausgeprägten Tagesgang auf. Durch eine möglichst weitgehende **Vergleichmäßigung der Zulauffrachten und -mengen** könnte der Kläranlagenbetrieb vereinfacht werden.
- Aus der Betrachtung des Zusammenspiels der Systeme zur Abwasser- und organischen Reststoffbehandlung ergeben sich folgende wesentliche **Ansatzpunkte für die Betriebsunterstützung und -optimierung**:
 - die Ausnutzung vorhandener Speicherkapazitäten sowie ein abgestimmter Betrieb von organischer Reststoffbehandlung und Abwasserreinigung, um möglichst umweltschonende Entsorgungswege zu nutzen sowie eine optimierte Beschickung der Schiffskläranlage zu erreichen (Zulaufbewirtschaftung),
 - die Optimierung des Schiffskläranlagenbetriebs hinsichtlich Ablaufwerten, Prozessstabilität, Personalaufwand, Energiebedarf usw.

Kernaussagen

- Für die Entwicklung des OSCAR-PLS** wurde daraus Folgendes abgeleitet:
 - Da die biologische Stufe ein für die Reinigungsleistung der Schiffskläranlage ausschlaggebender aber auch störanfälliger Prozessschritt ist, wird hierauf ein besonderer Fokus gelegt.
 - Neben den Behandlungsprozessen werden der Anfall einzelner Abwasserteilströme sowie deren Speicherung und Vorbehandlung mitbetrachtet. Dies erlaubt zum einen, die Zusammensetzung des Kläranlagenzulaufs aus den Betriebsdaten der Speichertanks zu berechnen. Zum anderen kann die Speichertankbewirtschaftung in die Betriebsunterstützung und -optimierung einbezogen werden.
- Die vorgenommene **teilstrombasierte Charakterisierung** der zu behandelnden Stoffströme ermöglicht die Abschätzung des Kläranlagenzulaufs aus Speichertankdaten (siehe auch Abschnitt 3.2.2) und liefert darüber hinaus eine wertvolle **Datengrundlage**, um **alternative Behandlungs- und Verwertungskonzepte** für Abwasser und organische Reststoffe an Bord zu entwickeln, bspw. in Kombination mit neuen Umwelttechnologien an Bord wie der Biogaserzeugung aus organischen Reststoffen und/oder organisch hoch belasteten Abwasserströmen.

2.1.1 Abwasser- und organische Reststoffbehandlung an Bord

Bild 2 zeigt eine vereinfachte Übersicht der Abwasser- und organischen Reststoffbehandlung an Bord der in OSCAR betrachteten Schiffsklasse.

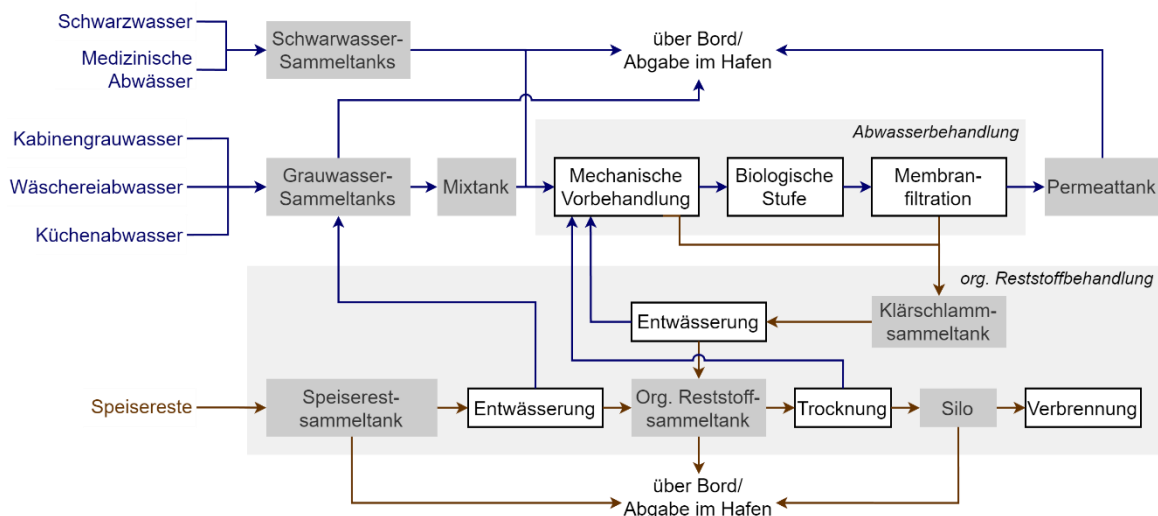


Bild 2 Vereinfachte Übersicht der Abwasser- und organischen Reststoffbehandlung an Bord

Das Schwarzwasser aus den Toiletten und Urinalen sowie medizinische Abwässer zählen zum Schwarzwasser und sind nach Annex IV des MARPOL-Abkommens zu behandeln. Kabinengrauwasser, Küchenabwasser, Abwässer aus der organischen Reststoffbehandlung und Wäschereiabwasser sind als Grauwasser nicht behandlungspflichtig, aber werden auf der in OSCAR betrachteten Schiffsklasse (wie auf vielen vergleichbaren Schiffen) ebenfalls aufbereitet.

Anfallende Abwasserteilströme werden gespeichert, bevor sie der Abwasserbehandlung zugeführt werden. In der Regel werden die Abwässer nach Behandlung in der Schiffskläranlage über Bord entsorgt. Alternativ kann das Abwasser vor oder nach Behandlung gespeichert und anschließend im Hafen ab-

gegeben werden. Dafür benötigte Hafenauffangeinrichtungen sind in den Häfen der Ostsee in den letzten Jahren ausgebaut worden und erlauben in vielen Fällen eine kostenlose Abgabe der Abwässer bis zu einem bestimmten Volumen (Helcom, 2020). Nach IMO MEPC.227(64) inkl. Anhang 4.2 zertifizierte Anlagen können Ablaufwerte erreichen, die mit denen landseitiger Kläranlagen vergleichbar sind, so dass – bei sachgerechtem Betrieb – die direkten Schmutz- und Nährstoffemissionen nicht höher sind als bei Abgabe der Abwässer im Hafen mit nachfolgender Aufbereitung durch landseitige Kläranlagen.

Organische Reststoffe (Speisereste, Siebgut und Klärschlamm) können nach Zerkleinerung innerhalb der im MARPOL-Abkommen (Annex V) festgelegten Randbedingungen über Bord gegeben werden. Aus umweltschutztechnischer Sicht ist die landseitige Abgabe der Entsorgung im Meer grundsätzlich vorzuziehen, wofür jedoch ausreichende Speichervolumina verfügbar sein müssen. Um das für die Zwischenspeicherung benötigte Volumen zu reduzieren, besteht die Möglichkeit, die organischen Reststoffe an Bord zu entwässern und zu trocknen. Zudem verfügen viele Schiffe über Systeme zur Verbrennung getrockneter Reststoffe, die aber nicht regelmäßig genutzt werden.

Für die Stabilität der biologischen Prozesse in der Schiffskläranlage ist ein weitgehend durchgängiger Betrieb mit möglichst konstanter Beschickung erforderlich, der so an Bord (bisher) nicht gegeben ist. Schwankungen der Zulaufmenge und -zusammensetzung erfordern (z. T. manuelle) Anpassungen der Betriebsparameter der Kläranlage, um eine konstant gute Ablaufqualität zu erreichen. Wegen des üblicherweise geringen Umfangs an Sensorik und Analytik sind bislang nur wenige direkte Informationen verfügbar, um festzustellen, wann und inwiefern eine Anpassung der Betriebseinstellungen nötig ist, und ob die gewählte Einstellung den gewünschten Effekt erzielt. Die in OSCAR angestrebte Verbesserung des Prozessmonitorings setzt hier an und soll die Grundlage zur Erreichung eines stabilen und effizienten Anlagenbetriebs (manuell und/oder automatisiert) schaffen.

Im Gegensatz zu den biologischen Prozessen der Schiffskläranlage können die Entwässerung und Trocknung stundenweise und in unregelmäßigen Abständen betrieben werden. Die dabei anfallenden hochkonzentrierten Abwässer führen bei direkter Zugabe zu hohen Belastungsspitzen in der Schiffskläranlage (siehe auch Abschnitt 2.1.2). Entsprechend ist ein auf die vorherrschenden Randbedingungen (Abgabemöglichkeiten, verfügbares Speichervolumen, Belastung der Kläranlage) abgestimmter Betrieb der organischen Reststoffbehandlungsprozesse nötig, um die Reststoffabgabe ins Meer zu minimieren und gleichzeitig einen stabilen Kläranlagenbetrieb sicherzustellen.

2.1.2 Charakterisierung der Stoffströme und der Zulaufdynamik

Die Kenntnis der Menge und Zusammensetzung der zu behandelnden Stoffströme ist eine wichtige Voraussetzung für eine gezielte Betriebsunterstützung und -optimierung. Daher wurde eine detaillierte Charakterisierung der relevanten Stoffströme anhand verschiedener, bisher nur vereinzelt vorliegender sowie neuer Datenquellen vorgenommen. Der Fokus lag dabei auf den Abwasserteilströmen. Informationen zu Menge und Zusammensetzung von Speiseresten und Klärschlamm wurden im Forschungs- und Entwicklungs-Projekt CLEAN erhoben und finden sich in Schumüller, Weichgrebe und Köster (2021) sowie dem Abschlussbericht des Projektes CLEAN (BMW FKZ 03SX437C, Veröffentlichung voraussichtlich 2024).

Um eine Abschätzung der Zulaufzusammensetzung aus den Betriebsdaten der Abwassersammeltanks sowie ein gezieltes Zulaufmanagement zu ermöglichen (siehe auch Abschnitt 2.2), wurden die Abwasserteilströme einzeln betrachtet. Darüber hinaus ermöglicht die Charakterisierung der einzelnen Teilströme neue Konzepte zur Behandlung und Nutzung der Abwasser- und organischen Reststoffströme, auch in Kombination mit neuen Umwelttechnologien wie bspw. der Biogaserzeugung aus organischen

Reststoffen und/oder organisch hoch belasteten Abwasserströmen, zu betrachten. So können z. B. die Auswirkungen der separaten Behandlung einzelner Teilströme oder der resultierende Zulauf in Kombination mit neuen oder durch eine Vorbehandlung veränderten Teilströmen abgebildet werden.

Die maßgeblich an Bord anfallenden Abwasserströme, die der Behandlung in der Schiffkläranlage zugeführt werden können, sind in Tabelle 1 kurz beschrieben. Darüber hinaus können zusätzliche Abwasserströme anfallen, z. B. aus der Brauerei, die ebenfalls der Kläranlage zugeführt werden. Weitere auf Kreuzfahrtschiffen anfallende Abwässer, wie bspw. Bilgenwasser, Rauchgaswaschwasser, Kondensat aus der Klimaanlage oder Poolwasser, werden nicht biologisch behandelt und wurden daher nicht näher betrachtet.

Tabelle 1 Abwasserteilströme an Bord

Schwarzwasser	Abwasser aus Toiletten und Urinalen
Kabinengrauwasser	aus Waschbecken, Duschen und Badewannen
Küchenabwasser	von Spülen, Geschirrspülmaschinen und Bodenabläufen der Bordküchen und Restaurants; in der Regel Vorbehandlung über Fettabscheider
Wäschereiabwasser	aus zentraler Wäscherei und Waschsalongen
Presswasser aus der Speiserestentwässerung	Flüssigphase aus der Speiserestentwässerung; in der Regel Vorbehandlung über Fettabscheider
Zentrat aus Klärschlamm-entwässerung	Zentrat, das bei der Entwässerung von Überschussschlamm und Siebrückständen anfällt
Brüdenkondensat aus der Schlammtrocknung	Kondensat, das bei der Trocknung organischer Reststoffe (Siebrückstände, Klärschlamm und Speisereste) anfällt

Um ein möglichst vollständiges Bild zu generieren, wurden Daten aus verschiedenen Quellen zusammengetragen und mit den in OSCAR erhobenen Daten kombiniert. Wesentliche genutzte Datenquellen sind im Anhang A.1 beschrieben.

Bild 3 bis Bild 6 zeigen typische Tagesgänge des Volumenstroms sowie der Frachten an chemischem Sauerstoffbedarf (CSB), Gesamtstickstoff (engl. *total nitrogen*, kurz TN) und Gesamtphosphor (engl. *total phosphorus*, kurz TP) der Abwasserteilströme und des resultierenden Mischabwassers an einem Seetag (nach Vorbehandlung, ohne Berücksichtigung der Speichertanks, für 2745 Personen). Die Daten wurden über eine Massenbilanz aus den einzelnen Abwasserteilströmen berechnet. Außer für Schwarzwasser wurde vereinfachend eine konstante Zusammensetzung der Teilströme angenommen, da keine Daten zur Schwankung der Konzentrationen über den Tagesverlauf vorlagen. Details zu den zugrunde gelegten Daten für die Volumenströme und die Zusammensetzung der einzelnen Teilströme sowie die für die Vorbehandlung angesetzten Entfernungsgrade können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2 Zur Berechnung eines typischen Tagesganges zugrunde gelegten Daten

Teilstrom	Abkürzung	Volumenstrom	Zusammensetzung vor Vorbehandlung		
			CSB (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
Schwarzwasser	BW	berechnet (siehe Anhang B.1.2)	berechnet (siehe Anhang B.1.2)		
Kabinengrauwasser	AccGW	aufgezeichnete Tankfüllstandsdaten (siehe Anhang A.1.2)	325	8	2,2
Wäschereiabwasser	Laundry	ca. 25 L/(Pd), konstanter Betrieb von 6:00 bis 18:00 Uhr	360	8	2
Küchenabwasser	Galley	aufgezeichnete Tankfüllstandsdaten (siehe Anhang A.1.2)	2.500	40	10
Speiserestpresswasser	FWR	0,7 L/(Pd), konstanter Betrieb von 10:00 bis ca. 11:40 Uhr	160.000	4.000	1.200
Vorbehandlung			Entfernungsgrad		
Fettabscheider (Galley, FWR)			40%	-	-
Mechanische Vorbehandlung (alle Ströme)			40%	8%	17%

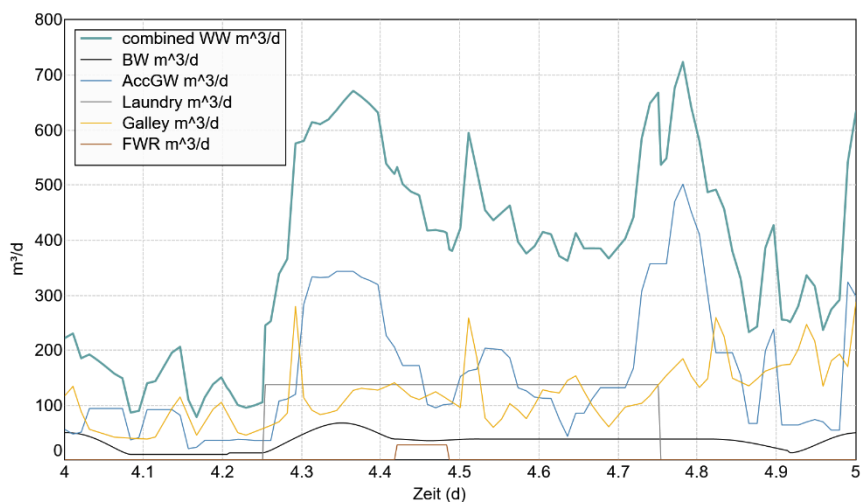


Bild 3 Tagesverlauf des Abwasseranfalls an einem Seetag (Teilströme und resultierendes Mischabwasser, 2745 Personen, weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2)

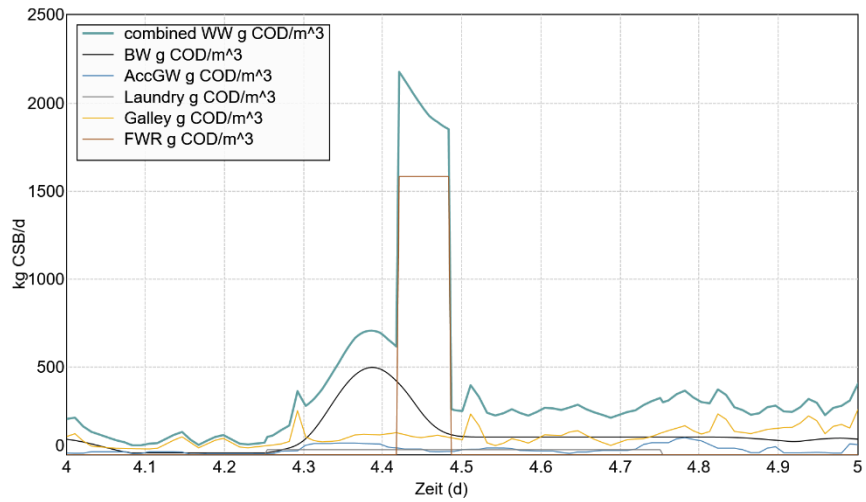


Bild 4 Tagesverlauf der anfallenden CSB-Fracht an einem Seetag (Teilströme und resultierendes Mischabwasser, inkl. Vorbehandlung, 2745 Personen, weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2)

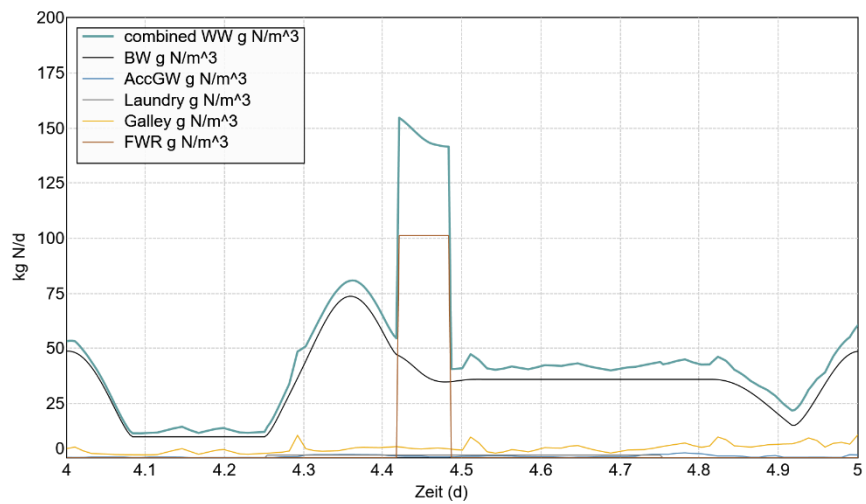


Bild 5 Tagesverlauf der anfallenden TN-Fracht an einem Seetag (Teilströme und resultierendes Mischabwasser, inkl. Vorbehandlung, 2745 Personen, weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2)

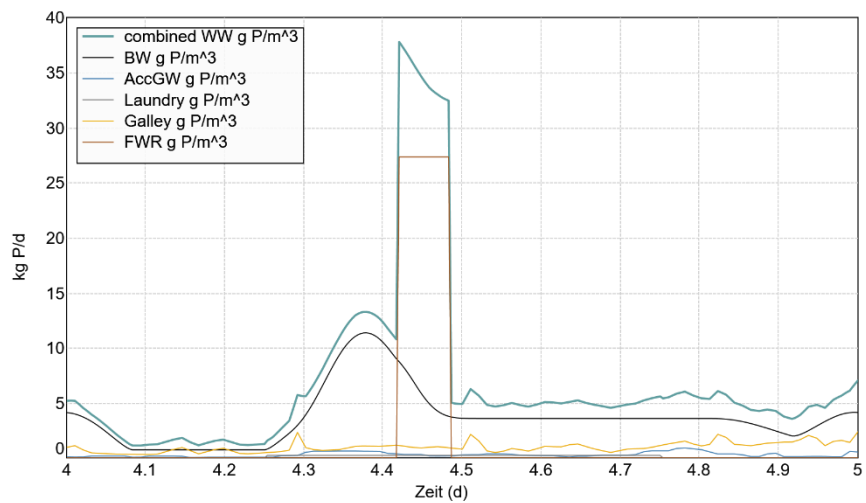


Bild 6 Tagesverlauf der anfallenden TP-Fracht an einem Seetag (Teilströme und resultierendes Mischabwasser, inkl. Vorbehandlung, 2745 Personen, weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2)

Zusammenfassend ist festzustellen:

- Alle betrachteten Parameter weisen einen ausgeprägten Tagesgang auf, der von geringen Werten in den Nachtstunden (ca. 1:00 bis 6:00 Uhr) und Spitzen am Morgen gekennzeichnet ist. Zusätzliche Spitzen sind am späten Nachmittag beim Volumenstrom und am späten Abend bei der TN-Fracht zu verzeichnen (vgl. auch Bild 29 und Bild 32 im Anhang).
- Die Anfalldynamik des Schwarzwassers verursacht über den Tagesverlauf deutlich variierende CSB-, TN- und TP-Frachten.
- Das Speiserestpresswasser wirkt sich aufgrund der relativ kurzen Anfalldauer deutlich auf den Tagesgang der CSB-, TN- und TP-Frachten aus, trotz der relativ moderaten Anteile an der Gesamttagesfracht von max. 25%.
- Der Tagesverlauf des mengenmäßigen Abwasseranfalls wird vor allem durch das Kabinengrauwasser und das Küchenabwasser und, in geringerem Ausmaß, durch das Wäschereiabwasser bestimmt (je ca. 45%, 30% und 15% des Tagesvolumens).

Für den Betrieb der Schiffskläranlage und das Zulaufmanagement folgt daraus:

- Zur Vergleichmäßigung des Tagesverlaufs der TN- und TP-Frachten ist im Wesentlichen eine Vergleichmäßigung des Schwarzwassers und des Speiserestpresswassers nötig. Dadurch würde auch die CSB-Fracht im Kläranlagenzulauf deutlich konstanter ausfallen. Da sowohl Schwarzwasser als auch Speiserestpresswasser mengenmäßig geringe Teilströme sind, wären dazu nur vergleichsweise geringe Speicherkapazitäten notwendig.
- Alternativ könnte die Speiserestentwässerung nachts betrieben werden, wenn die Belastung durch die anderen Teilströme gering ist. Dadurch kann jedoch keine so weitgehende Vergleichmäßigung erreicht werden wie durch die Speicherung von Speiserestpresswasser und Schwarzwasser.
- Eine Vergleichmäßigung der zu behandelnden Abwassermenge würde deutlich größere Speicherkapazitäten erfordern als der oben betrachtete Ausgleich der Frachten.

Um zu prüfen, inwiefern durch die aktuelle Nutzung der Speichertanks bereits ein Ausgleich der Zulauf-frachten erzielt wird, wurde ein hydraulisches Modell der Speichertanks und Kläranlage des in OSCAR betrachteten Schiffs inkl. aktueller Regelungsalgorithmen für die Tankentleerung und Pumpensteuerung in der Simulationssoftware SIMBA# aufgebaut (Ausschnitt in Bild 7). Für die Berechnungen wurde ein konstanter Permeatvolumenstrom angesetzt, der leicht über dem Tagesmittelwert liegt. Die berechneten Daten wurden mit den vorliegenden Aufzeichnungen der Speichertankfüllstände abgeglichen, um sicherzustellen, dass die berechneten Werte plausibel sind. Bild 8 bis Bild 10 zeigen die im Zulauf zur Kläranlage resultierenden Frachten für den oben betrachteten Tagesgang (vgl. Bild 4 bis Bild 6). Zum Vergleich sind das 1 h-Mittel der Zulauffracht mit Speicherung und die Frachten ohne Speicherung ebenfalls dargestellt. Aus den Diagrammen wird deutlich, dass mit der aktuellen Speichertanksteuerung nur ein teilweiser Ausgleich der Zulauffrachten erreicht wird. In den Nachtstunden erfolgt die Beschickung nur sehr selten. Tagsüber auftretende Frachtspitzen werden zwar abgeschwächt, aber nicht gänzlich ausgeglichen. Angesichts des mit der aktuellen Regelung meist geringen und relativ gleichbleibenden Füllstandes der Speichertanks ist anzunehmen, dass die vorhandene Speicherkapazität durch eine verbesserte Regelungsstrategie besser ausgenutzt werden könnte.

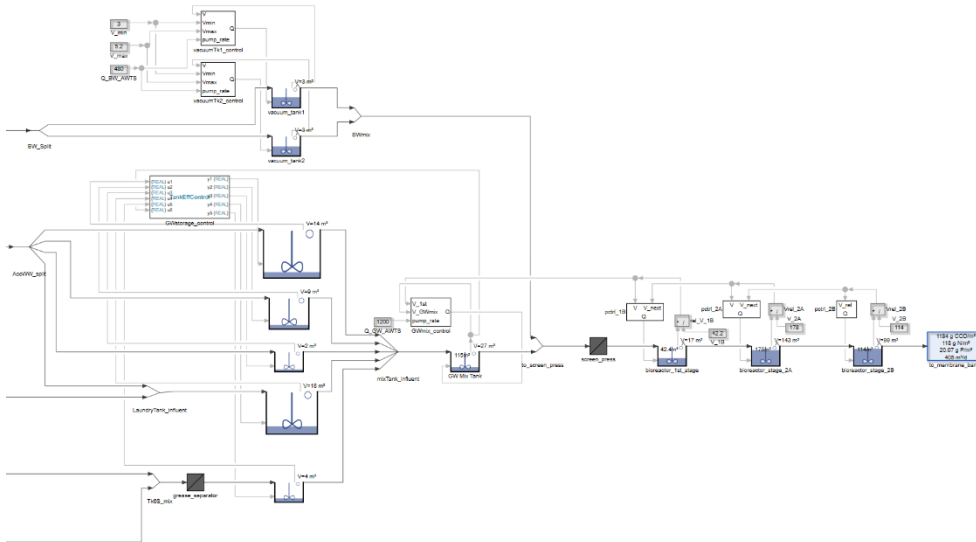


Bild 7 Screenshot eines Ausschnittes des Speichertankmodells

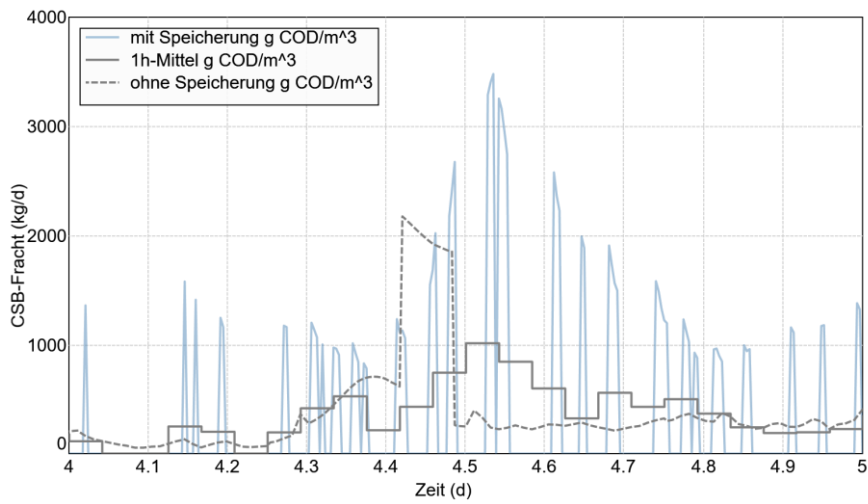


Bild 8 Tagesverlauf der CSB-Fracht im Kläranlagenzulauf unter Berücksichtigung der Abwasserspeicherung (2745 Personen, weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2)

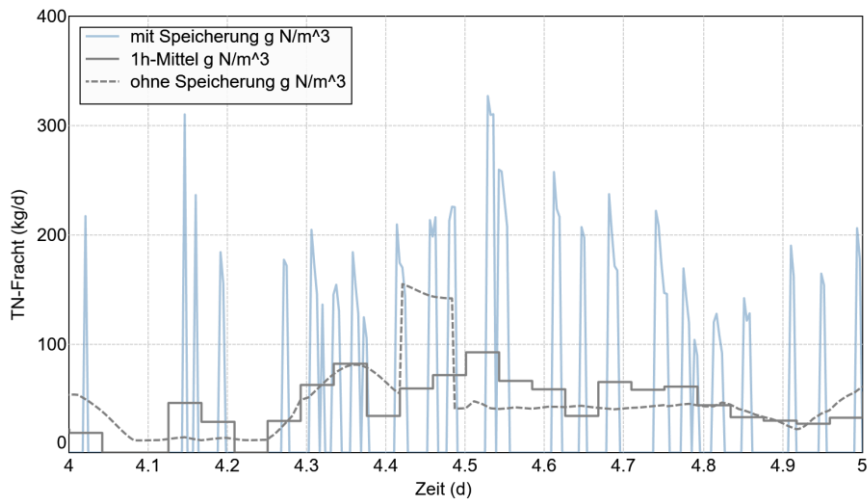


Bild 9 Tagesverlauf der TN-Fracht im Kläranlagenzulauf unter Berücksichtigung der Abwasserspeicherung (2745 Personen, weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2)

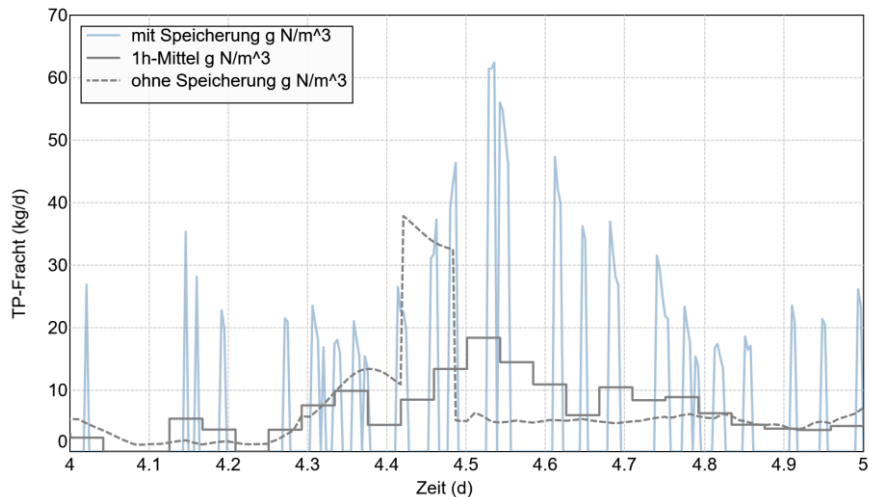


Bild 10 Tagesverlauf der TP-Fracht im Kläranlagenzulauf unter Berücksichtigung der Abwasserspeicherung (2745 Personen, weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2)

2.2 Ansatzpunkt Zulaufbewirtschaftung

Ziel der Zulaufbewirtschaftung ist es, kurzfristige Schwankungen der Zulaufkraft auszugleichen (Ausgleich des Tagesganges), um einen möglichst gleichmäßigen bzw. auf den Zustand der Schiffskläranlage abgestimmten Zulauf zu erzeugen. Dadurch kann eine stabile Ablaufqualität mit weniger Eingriffen in den Kläranlagenbetrieb erreicht werden. Die weitgehend separate Speicherung der Abwasserteilströme an Bord ermöglicht eine gezielte Zusammenstellung des Kläranlagenzulaufs (im Rahmen der verfügbaren Speicherkapazitäten). Für manche Teilströme kann zudem der Zeitpunkt des Abwasseranfalls beeinflusst werden (bspw. Abwässer aus organischer Reststoffbehandlung).

Anhand bekannter theoretischer Zusammenhänge und Erfahrungswissen wurden wesentliche Zielsetzungen für das Zulaufmanagement hergeleitet. Um die praktische Umsetzbarkeit einzuschätzen, wurden die bestehenden Voraussetzungen und Möglichkeiten für die Umsetzung analysiert.

Kernaussagen

- Durch die Vergleichmäßigung des Kläranlagenzulaufs bzw. die Anpassung des Zulaufs an den aktuellen Betriebszustand der Kläranlage sind weniger Betriebseingriffe erforderlich, um günstige Betriebsbedingungen aufrecht zu halten. Weitere Vorteile, die sich ergeben können, sind:
 - geringere Ammoniumfrachten im Ablauf der Kläranlage durch Vermeidung von Stickstofffrachtspitzen im Zulauf,
 - stabile Denitrifikation durch durchgehend ausreichende CSB-Zufuhr in der Denitrifikationsstufe.

Neben der Vereinfachung des Betriebes sind durch einen ausgeglichenen Zulauf (oder zumindest die Abpufferung von Lastspitzen) perspektivisch Optimierungen/Einsparungen bei der Auslegung der Schiffskläranlage möglich. Anlagenteile, die auf eine zu erwartende Maximallast ausgelegt werden (bspw. Belüfterkapazität, Membranfläche), könnten kleiner gehalten werden.

- Allgemeine **Ziele des Zulaufmanagements** zum Zwecke eines stabilen Kläranlagenbetriebes sind:
 - Vergleichmäßigung der Stickstofffracht und Vermeidung von über die Nitrifikationskapazität hinausgehenden Stickstoff-Frachtspitzen, um eine gleichmäßige Belüftung und Rezirkulation zu ermöglichen sowie erhöhte Ammonium-Ablaufwerte zu vermeiden,

Kernaussagen

- Anpassung der CSB-Fracht an die Stickstofffracht, um ausreichend CSB für die Denitrifikation bereitzustellen,
 - Vergleichmäßigung der Phosphorfracht, um eine gleichmäßige Fällmitteldosierung zu ermöglichen,
 - möglichst gleichmäßige hydraulische Belastung, um Anpassungen der Permeat- und Rezirkulationsströme zu vermeiden.
- Ist keine ausreichende Vergleichmäßigung des Zulaufs über den Tag möglich, sollten Phasen mit niedriger Belastung im Wechsel mit Phasen höherer Belastung, kombiniert mit einer entsprechenden Anpassung der Betriebsparameter der Kläranlage, angestrebt werden (bspw. stärkere Belüftung und/oder größerer Permeatvolumenstrom während der stärker belasteten Phase am Tag, geringere Belüftung und/oder niedrigerer Permeatvolumenstrom in der Nacht).
 - Ein erweitertes Zulaufmanagement wäre mit den bereits vorhandenen Systemen weitgehend umsetzbar und würde im Wesentlichen Anpassungen der Speichertankregelungssoftware und der organisatorischen Abläufe erfordern.
 - Da die Speichertankentleerung automatisiert erfolgen muss, sind entsprechende Regelungsalgorithmen für die Speichertankbewirtschaftung erforderlich. Dazu besteht weiterer Entwicklungsbedarf. Die in OSCAR ermittelten Daten zur Zusammensetzung und Anfalldynamik der Abwasserströme bilden eine erste Grundlage dafür.
 - Die Kenntnis der Teilstromqualitäten und die Möglichkeit der gezielten Zuleitung bestimmter Teilströme zur Kläranlage kann in gewissen Betriebssituationen auch in der manuellen Steuerung ausgenutzt werden, bspw. zur Zudosierung von CSB (z. B. aus Speiserestpresswasser) bei hohen Nitratkonzentrationen.
 - Beim Entwurf neuer Schiffe sollten abwassertechnische Gesichtspunkte in die Gestaltung der Abwasserspeichertanks einfließen und die fallspezifischen Möglichkeiten des Zulaufmanagements bei der Auslegung der Kläranlage berücksichtigt werden (Dimensionierung, benötigte betriebliche Flexibilität hinsichtlich Belüftung und Hydraulik).

2.2.1 Ziele und Ansatzpunkte für das Zulaufmanagement

1. Ausgleich der Stickstofffracht und Vermeidung von über die Nitrifikationskapazität hinausgehenden Stickstoff-Frachtspitzen

Hintergrund:

- Da Stickstoff von den autotrophen Mikroorganismen nicht gespeichert werden kann, werden über die Nitrifikationskapazität hinausgehende Frachten nicht umgesetzt und führen zu erhöhten Stickstoffkonzentrationen im Ablauf sowie vermehrter Lachgas (N_2O)-Bildung (starkes Treibhausgas). Dadurch ist zudem die für den Aufbau bzw. die Aufrechterhaltung der autotrophen Biomasse genutzte Stickstofffracht geringer, wodurch die Nitrifikantenpopulation und damit die Nitrifikationskapazität ebenfalls geringer sind.
- Die Nitrifikation verursacht eine hohe Sauerstoffzehrung, weshalb Schwankungen der zu nitrifizierenden Stickstofffracht für einen optimalen Betrieb durch Anpassungen der Belüftung (Intensität und/oder Taktung) ausgeglichen werden müssen. Anderenfalls reicht die Sauerstoffversorgung bei hohen Stickstofffrachten nicht aus, sodass weniger Stickstoff nitrifiziert werden

kann, was die oben erläuterten Effekte zusätzlich verstärkt. In Phasen geringer Belastung ist die Gelöstsauerstoffkonzentration (engl. *dissolved oxygen*, kurz DO-Konzentration) ohne Anpassung der Belüftung ggf. unnötig hoch, was einen unnötigen Energiebedarf verursacht und die Bedingungen für die Denitrifikation verschlechtert (Hemmung durch Sauerstoff).

Ansatzpunkte für die Umsetzung:

- Vergleichmäßigung der Schwarzwasserzugabe und der Speiserestpresswasserzugabe – Ca. 75-90% der Stickstoff-Fracht stammen aus dem Schwarzwasser. Das Speiserestpresswasser trägt zwar nur ca. 13% zur Stickstofffracht bei, aber fällt über einen relativ kurzen Zeitraum an und beeinflusst den Tagesgang der Stickstofffracht dadurch ebenso merklich (vgl. Bild 5). Aufgrund des vergleichsweise geringen Volumens des Schwarzwassers und des Speiserestpresswassers (ca. 10-25 L/(Pd) bzw. 0,3-1,8 L/(Pd), siehe Anhang A.2.1) sind keine großen Speicherkapazitäten erforderlich, um den Anfall beider Teilströme über den Tag auszugleichen und so eine Vergleichmäßigung der Stickstofffracht zu erreichen. Alternativ kann angestrebt werden, die Speiserestentwässerung in Zeiten geringer sonstiger Belastung (d. h. nachts) durchzuführen, siehe auch Abschnitt 2.1.2.
- Wenn keine weitgehende Vergleichmäßigung möglich ist: Phasen mit geringerer Belastung und Verringerung der Belüftung sowie Phasen mit höherer Belastung und stärkerer Belüftung anstreben (bspw. Tag/Nacht-Betrieb).

2. Anpassung der CSB-Fracht an die Stickstofffracht

Hintergrund:

- Da CSB zur Denitrifikation des Stickstoffs benötigt wird, kann das in der Nitrifikation gebildete Nitrat nicht abgebaut werden, sofern keine ausreichende Menge an CSB zur Verfügung steht.
- Der aerobe Umsatz des CSB verursacht eine zusätzliche Sauerstoffzehrung und steht damit in Konkurrenz zur Nitrifikation. Die benötigte intensivere Belüftung erhöht den Energiebedarf. Daher sollte ein möglichst großer Anteil des CSBs unter anoxischen Bedingungen (Denitrifikation) umgesetzt werden.

Ansatzpunkte für die Umsetzung:

- Bei gleichmäßiger Stickstofffracht: Vergleichmäßigung der CSB-Fracht – Neben dem Schwarzwasser tragen insbesondere Küchenabwasser und Abwasser aus organischer Reststoffbehandlung zur CSB-Fracht bei (siehe auch Abschnitt 2.1.2).
- Bei schwankender Stickstofffracht sollte sich die Zugabe von CSB an der Nitratkonzentration in der Denitrifikation orientieren. Bei Stickstoffstoßbelastungen: möglichst geringe CSB-Fracht zu Beginn der Stickstoffspitze, um das Sauerstoffdargebot für die Nitrifikation zu maximieren.
- Insbesondere das Speiserestpresswasser könnte aufgrund der hohen Konzentration und des relativ hohen CSB:N-Verhältnisses von ca. 30 mg CSB/mg TN (siehe auch Anhang A.2.5) gezielt zur Zudosierung von CSB genutzt werden (im Sinne einer externen Kohlenstoffdosierung).

3. Vergleichmäßigung der Phosphor-Fracht

Hintergrund:

- Phosphor wird u. a. über den Einbau in die Biomasse aus dem Abwasser entfernt. Über den Bedarf der Mikroorganismen hinausgehende Phosphorfrachten werden an Bord in der Regel über chemische Fällung eliminiert. Je gleichmäßiger die Phosphorfracht im Zulauf desto seltener muss die Fällmitteldosierung angepasst werden.

Ansatzpunkte für die Umsetzung:

- Vergleichmäßigung der Schwarzwasserzugabe und der Speiserestpresswasserzugabe – siehe Punkt 1 oben; die Phosphor-Fracht stammt ebenso wie die Stickstoff-Fracht zum größten Teil aus Schwarzwasser und Speiserestpresswasser (ca. 55% bzw. 25% der Tagesfracht).
- Sofern keine weitergehende Vergleichmäßigung möglich ist: Phasen mit niedrigen und hohen Phosphorfrachten mit entsprechender Anpassung der Fällmitteldosierung anstreben (z. B. Tag/Nacht-Betrieb).

4. Gleichmäßige hydraulische Belastung

Hintergrund:

- Schwankungen der Zulaufmenge, die nicht durch die hydraulische Pufferkapazität der Anlage (variable Füllstände) abgefangen werden können, erfordern Anpassungen des Permeatvolumenstroms und ggf. der Rezirkulationsströme, um geeignete Reaktorfüllstände und Betriebsbedingungen sicherzustellen.
- Durch die Vergleichmäßigung der hydraulischen Belastung können hohe Membranfluxe vermieden werden, was sich positiv auf die Erhaltung der Membranpermeabilität auswirken kann (Vermeidung der Kompaktierung der Deckschicht).

Ansatzpunkte für die Umsetzung:

- Nutzung von Speichervolumen zum Ausgleich des schwankenden Abwasseranfalls, insbesondere der Teilströme mit großem Volumen wie Kabinengrauwasser, aber auch Küchen- und Wäschereiabwasser.
- Wenn kein ausreichender Ausgleich möglich ist: Phasen mit niedrigem und hohem Zulauf mit entsprechender Anpassung der Volumenströme der Anlage (Permeat, Rezirkulation) anstreben (z. B. Tag/Nacht-Betrieb).

5. Weitere ggf. zu berücksichtigende Aspekte

- Sofern Phosphor-akkumulierende Mikroorganismen vorhanden sind, können kurzfristig hohe Frachten an organischen Säuren (bspw. durch Zugabe von Speiserestpresswasser) zu erhöhter Freisetzung von Phosphat und damit zu erhöhten Ablaufwerten führen.
- Für die Nitrifikation muss ausreichend Säurekapazität vorhanden sein. Die Zugabe von Abwässern mit geringer Säurekapazität und ggf. geringem pH-Wert (bspw. Speiserestpresswasser) könnte hier ggf. limitierend sein. Zu hohe pH-Werte führen ebenfalls zu einer Hemmung der Nitrifikation.
- Da die Abwasserteilströme mit unterschiedlichen Temperaturen anfallen, könnte die Abwassertemperatur eine weitere für das Zulaufmanagement relevante Größe sein (Vermeidung großer Schwankungen und extremer Temperaturen).
- Bei der Speicherung des Abwassers ablaufende Prozesse (Ammonifikation, Vorversäuerung, Temperaturänderungen) können u. U. für die weitere Behandlung relevant sein. Die in OSCAR durchgeführten Untersuchungen zur Ammonifikation (Umwandlung von organischem gebundenem Stickstoff zu Ammonium) an der Laborkläranlage und der Schiffskläranlage (siehe Anhang C) deuten darauf hin, dass der Ammonifikationsgrad des Abwassers keinen wesentlichen Einfluss auf die Stickstoffelimination in der biologischen Stufe hat. Bei der Messung der Ammoniumkonzentration im Zulauf mit ionenselektiven Elektroden/Sonden (ISEn) ist jedoch zu beachten, dass ein Teil der Stickstofffracht ggf. in Form von organischem Stickstoff vorliegt und

demnach mit diesem Messprinzip nicht erfasst werden kann. Um die Relevanz der Vorversäuerung auf die Abwasserreinigung an Bord zu beurteilen, wären weitere Untersuchungen erforderlich.

- Einige Studien berichten, dass sich schwankende CSB-Konzentrationen auf die Zusammensetzung der Biozönose und die resultierenden Eigenschaften des Belebtschlammes auswirken können (Chiesa, Irvine und Manning, 1985, Lou und los Reyes, 2005 und Quellen darin). Hintergrund ist die höhere Netto-Wachstumsrate flockenbildender Organismen gegenüber filamentösen Organismen bei hohen Substratkonzentrationen, insbesondere in Verbindung mit Phasen geringer Belastung (sog. feast/famine-Regime). Da filamentöse Organismen zur Schaumbildung beitragen und ggf. auch die Filtrationseigenschaften des Belebtschlammes negativ beeinflussen, könnte eine stoßweise/intermittierende Beschickung zur gezielten Herbeiführung von feast/famine-Phasen sich mglw. vorteilhaft auf die Schlammeigenschaften auswirken. Hierzu wären jedoch weitere Untersuchungen erforderlich.

2.2.2 Voraussetzungen und Anforderungen für die Umsetzung

Wesentliche Messgrößen, die zur Umsetzung des Zulaufmanagements benötigt werden, sind die Füllstände der Abwasser- und Reststoffsammeltanks. Diese werden aus Gründen der Schiffssicherheit (Stabilität) üblicherweise kontinuierlich gemessen. Ausnahmen kann es bei kleineren Sammeltanks, wie bspw. den Vakuumentanks für Schwarzwasser, geben. Die Tanks verfügen in jedem Fall mindestens über Grenzstandsensoren (Voll- und Leermeldung) als Referenz für die Tankleerung. Eine Online-Messung oder engmaschige Beprobung der Abwasserqualität in allen Speichertanks ist nicht praktikabel (insbesondere aufgrund der damit verbundenen hohen Kosten und des großen Aufwandes). Stattdessen können typische Teilstromqualitäten angesetzt werden. Die in Anhang A.2 zusammengestellten Daten liefern hierfür grundlegende Informationen bzgl. typischer Konzentrationen und Schwankungsbreiten. Ob der Ansatz konstanter Qualitäten in der Praxis ausreichend ist, sollte bei der Entwicklung von Betriebsstrategien und Regelungsalgorithmen für die Speichertankentleerung untersucht werden.

Die an Bord vorhandenen Speichertankkapazitäten liegen bei wenigen Stunden bis mehreren Tagen, je nach Teilstrom und Schiffstyp. Die konkreten Möglichkeiten und Strategien zur Umsetzung des Zulaufmanagements müssen daher fallspezifisch eruiert werden. Beim Entwurf neuer Schiffe sollten abwassertechnische Gesichtspunkte soweit möglich in die Gestaltung der Abwasserspeichertanks einfließen, um ein möglichst gutes und einfaches Zulaufmanagement zu ermöglichen.

Grundsätzlich muss die Speichertankentleerung automatisch laufen, um rund um die Uhr einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Daher sind zur Umsetzung einer angepassten Beschickung entsprechende Regelungsalgorithmen erforderlich. Zwei Aspekte, die dabei einfließen könnten, sind:

- die Berücksichtigung des Zustands der biologischen Stufe (bspw. Nitratkonzentration in der Denitrifikations-Zone zur Zudosierung CSB-haltigen Abwassers, Abstimmung der Beschickung auf aktuelle Betriebseinstellungen etc.),
- eine prognosebasierte Bewirtschaftung des Speichervolumens (bspw. weitgehende Tankleerung bevor größere Abwassermengen erwartet werden und Vorhalten von Abwasser vor Phasen mit prognostiziertem geringem Abwasseranfall).

Die Entwicklung einer optimierten Speichertankregelung ist eine interessante Fragestellung für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Die in OSCAR zusammengestellten Daten und Informationen zur Tagesdynamik und zur zu erwartenden Zusammensetzung der Abwasserteilströme sowie das erstellte Speichertankmodell stellen einen guten Ausgangspunkt dafür dar. Da eine ähnliche Situation

auch bei etlichen Industriekläranlagen anzutreffen ist, sind die Anwendungsmöglichkeiten für intelligente Speichertankregelungen zudem nicht auf Kreuzfahrtschiffe beschränkt.

2.3 Ansatzpunkt Kläranlagenbetrieb

Die Unterstützung und Optimierung des Schiffskläranlagenbetriebes zielt darauf ab, bedarfsorientierte Betriebseingriffe und zielgerichtete Anpassungen der Betriebseinstellungen zu realisieren, um eine durchgehende Einhaltung der Ablaufwerte und einen langfristig stabilen und möglichst effizienten Betrieb sicherzustellen.

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen an Bord wurden Betriebsstrategien für die biologische Stufe der Schiffskläranlage aus bekannten theoretischen Zusammenhängen und Erfahrungen abgeleitet, die im folgenden Abschnitt erläutert werden. Ausgehend von der aktuellen Situation an Bord wird aufgezeigt, welche zusätzlichen Informationen zur konkreten Umsetzung im Prozess benötigt werden und wie die Umsetzung der Betriebsstrategien ermöglicht werden kann.

Kernaussagen

- Kurzfristige Schwankungen der Zulaufzusammensetzung und -menge, die nicht durch die Speichertankbewirtschaftung ausgeglichen werden können, sowie längerfristige Veränderungen durch bspw. veränderliche Personenzahlen an Bord, erfordern Anpassungen der Betriebseinstellungen und der Betriebsweise der Kläranlage.
- Während die grundsätzlichen Betriebsstrategien für die vorgeschaltete Denitrifikation weitgehend übertragbar sind, muss ihre konkrete Umsetzung an die fallspezifischen Voraussetzungen des Kläranlagenbetriebes angepasst werden. Dabei spielen insbesondere die Einstellmöglichkeiten der Aggregate, die vorhandenen Messwerte und Anlagendaten und die Möglichkeiten der Schlammensorgung eine Rolle. Diese fallspezifischen Aspekte werden bei der Gestaltung des OSCAR-PLS berücksichtigt.
- Aufgrund des üblicherweise geringen Umfangs an Sensorik und Analytik sind bislang nur wenige direkte Informationen verfügbar, um festzustellen, wann und inwiefern eine Anpassung der Betriebseinstellungen nötig ist, und ob die gewählte Einstellung den gewünschten Effekt erzielt. Ein Ziel für das OSCAR-PLS ist daher die bessere Ausnutzung vorhandener Informationen und die zielgerichtete Ergänzung zusätzlicher Daten, um die Informationsgrundlage für Betriebsentscheidungen zu verbessern.
- Da der Automatisierungsgrad und die Regelbarkeit der Aggregate der meisten Schiffskläranlagen derzeit noch gering sind, findet die Überwachung und Anpassung des Betriebs aktuell vor allem durch das Betriebspersonal an Bord statt. Der Fokus des OSCAR-PLS liegt daher zunächst auf der Unterstützung des manuellen Betriebs. Die in OSCAR angestrebte Verbesserung der Datengrundlage für das Prozessmonitoring stellt jedoch gleichzeitig einen wichtigen Schritt dar, um die Voraussetzungen für die Implementierung (automatisierter) Regelungsstrategien zu schaffen.

2.3.1 Betriebsstrategien für die biologische Stufe

Wesentliche Stellgrößen für den Kläranlagenbetrieb sind der Überschussschlammabzug, die Belüftung, die Einstellung der Rezirkulationsströme und die Fällmitteldosierung. Im Folgenden wird, abgeleitet aus bekannten theoretischen Zusammenhängen und Betriebserfahrungen, für jede der Stellgrößen kurz

aufgezeigt, welche Ziele und Randbedingungen zu berücksichtigen sind und welche Daten und Informationen als Grundlage für eine gezielte Betriebsführung vorhanden sein sollten. Ausführlichere Informationen dazu (nicht speziell für Schiffskläranlagen) finden sich u. a. in Henze (2008) und Olsson et al. (2005).

2.3.1.1 Überschussschlammabzug

Der Abzug von Überschussschlamm erfolgt in der Regel manuell und diskontinuierlich, von einigen Malen die Woche bis zu zwei Mal pro Tag.

Ziele und Strategien:

- Sicherstellen eines ausreichend hohen Schlammalters für die Nitrifikation – Ausschlaggebend für das benötigte Mindestschlammalter ist die (temperaturabhängige) Wachstumsgeschwindigkeit der autotrophen Mikroorganismen.
- Begrenzung der Feststoff-Konzentration – Zu hohe Feststoff-Konzentrationen wirken sich negativ auf den Sauerstoffeintrag und die Filtrationseigenschaften aus. Zudem kann eine geringe Schlammbelastung (Verhältnis von CSB-Fracht zu Schlammmasse) das Wachstum fadenförmiger Mikroorganismen und damit die Schaumbildung begünstigen.
- Ermöglichung einer möglichst praktikablen und umweltfreundlichen Schlammentsorgung, in Abhängigkeit der Entsorgungsmöglichkeiten und Wege – Oberstes Ziel sollte dabei sein, die Entsorgung von Schlamm über Bord zu vermeiden. Sofern eine längere Lagerung an Bord erforderlich ist und/oder die Entsorgung an Land selten möglich, kann es sinnvoll sein, ein längeres Schlammalter anzustreben, um den Schlamm aerob zu stabilisieren. Dadurch verringern sich die Schlammproduktion sowie die Geruchsbildung und ungewollte Faulung bei der Schlamm Lagerung (dagegen kann auch die Belüftung des abgezogenen Schlammes helfen). Nachteilig ist der erhöhte Energiebedarf für die Belüftung. Wird der Schlamm anaerob verwertet, sollte ein möglichst geringes Schlammalter angestrebt werden (höherer Energiegehalt des Schlammes, weniger Energiebedarf für die Belüftung). Zudem wird bei geringen Schlammaltern mehr Stickstoff und Phosphor in den Schlamm inkorporiert, sodass weniger Stickstoff zu nitrifizieren ist (Einsparung bei der Belüftung) und weniger Fällmittel benötigt wird.

Dynamik:

- Langsam – Schlammzuwachs und Änderungen der Schlammzusammensetzung dauern mehrere Tage bis Wochen. Insbesondere der Zuwachs an autotrophen Mikroorganismen (für die Nitrifikation) ist ein langsamer Prozess, sodass eine Vergrößerung der Nitrifikanten-Population (bspw. zur Erhöhung der Nitrifikationskapazität vor einer Phase mit geringerer Temperatur) frühzeitig eingeleitet werden muss.

Benötigte Daten und Informationen:

- einzuhaltendes Mindestschlammalter für die Nitrifikation (temperaturabhängig)
- aktuelles Schlammalter
- aktueller Feststoff-Gehalt der biologischen Stufe (i. d. R. gemessen als Trockensubstanz, kurz TS)
- Speicher- und Abgabemöglichkeiten für Überschussschlamm

2.3.1.2 Belüftung

Je nach Anlagentyp verfügen die Bioreaktoren über einen oder mehrere Belüfter, die entweder einstellbar sind oder nur an- und abgeschaltet werden können. Häufig können sowohl die Nitrifikationszone als

auch die Denitrifikationszone belüftet werden. Die Steuerung der Belüfter erfolgt in der Regel zeitgetaktet oder manuell.

Bei getauchten Membranen gibt es zudem eine grobblasige Membranbelüftung zur Abreinigung der Deckschicht, die dauerhaft eingeschaltet ist.

Ziele und Strategien:

- Sicherstellung ausreichender Sauerstoffversorgung für Nitrifikation und ggf. aeroben CSB-Abbau – Für eine uneingeschränkte Nitrifikation ist eine DO-Konzentration > ca. 2 mg/L anzustreben (mindestens 1 mg/L). Je nach Anlagenkonfiguration kann zur kurzzeitigen Erhöhung der Nitrifikationskapazität (bspw. während Frachtspitzen) zusätzlich die Denizone belüftet und/oder die Dauer der belüfteten Phase verlängert werden.
- Begrenzung der Belüftung auf das erforderliche Minimum – Um die Bedingungen für die Denitrifikation zu verbessern (Hemmung durch Sauerstoff) sowie den Energiebedarf und die Schaumbildung zu minimieren, sollte nicht mehr als nötig belüftet werden. Da der aerobe CSB-Abbau auch bei DO-Konzentrationen von 0,5 bis 1 mg/L problemlos abläuft, kann (sofern diese bekannt ist) bei geringer Ammoniumkonzentration in der Nitrifikationszone bzw. im Ablauf die DO-Konzentration gesenkt werden.

Dynamik:

- schnell – Änderungen der Sauerstoffzehrung und des -eintrags sowie die daraus resultierenden Änderungen der DO-Konzentration finden innerhalb < 1 min bis wenigen Minuten statt. Entsprechend wirken sich kurzfristige Veränderungen der Zulauffracht direkt auf die DO-Konzentration aus.

Benötigte Daten und Informationen:

- DO-Konzentration
- ggf. Ammoniumkonzentration in Nitrifikationszone bzw. Ablauf

2.3.1.3 Rezirkulationsströme

Je nach Anlagenkonfiguration gibt es einen oder mehrere Rezirkulationsströme zur Rückführung von Schlamm und Nitrat aus der belüfteten Zone in die Denitrifikationszone, deren Volumenstrom zumeist manuell eingestellt wird.

Ziele und Strategien:

- Rückführung von Nitrat in die Denitrifikationszone – Das in der Nitrifikation gebildete Nitrat wird über die Rezirkulationsströme in die anoxische Zone zur Denitrifikation zurückgeführt. Ziel sollte dabei sein, die vorhandene Denitrifikationskapazität (die vom verfügbaren CSB abhängt) möglichst weitgehend auszunutzen, da so weniger CSB aerob abgebaut werden muss (weniger Belüftung = geringerer Energiebedarf).
- Rückführung von Schlamm – Die Rezirkulation dient gleichzeitig der Rückführung von Schlamm. Über die Verteilung des Schlammes ist eine indirekte Einstellung der aeroben und anoxischen Anteile möglich, die ggf. ebenfalls gezielt in der Betriebsführung genutzt werden kann (z. B. Verlagerung von mehr Schlamm in die belüftete Zone, um die Nitrifikationskapazität zu erhöhen).
- Begrenzung auf minimal nötigen Volumenstrom zur Schlamm- und Nitratrückführung in die Denitrifikationszone – Um die Verschleppung von Sauerstoff in die anoxische Zone zu minimieren, sollte nur gerade so viel wie nötig zurückgeführt werden.

Dynamik:

- schnell bis mittel – Änderungen der Stickstoff- und Schlammkonzentrationen durch Anpassungen der Rezirkulationsströme wirken sich je nach Ausmaß der Veränderung und aktuellen Randbedingungen innerhalb weniger Minuten bis einiger Stunden aus.

Benötigte Daten und Informationen:

- Nitratkonzentration in der Denitrifikationszone (z. B. direkt über Nitratmessung oder indirekt über Messung des Redoxpotenzials)
- Schlammverteilung/TS-Gehalt der Reaktoren

2.3.1.4 Fällmitteldosierung

Fällmittel wird üblicherweise über eine manuell einstellbare Dosierpumpe dosiert.

Ziele und Strategien:

- Begrenzung auf minimal für eine ausreichende Phosphorelimination benötigte Fällmittelmenge – Da die Dosierung von Fällmittel die Schlammproduktion erhöht und das Fällmittel eingekauft und vorgehalten werden muss, sollte idealerweise in Abhängigkeit der zu fällenden Phosphorfracht (d. h. Phosphor aus dem Zulauf abzüglich der in den Schlamm inkorporierten Phosphormenge) nur so viel Fällmittel dosiert werden, wie zur Einhaltung der angestrebten Ablaufwerte erforderlich.

Dynamik:

- schnell – Die Fällung ist ein sehr schnell ablaufender chemisch-physikalischer Vorgang, sodass Änderungen der Fällmitteldosierung sich innerhalb weniger Minuten auf die Phosphorkonzentration auswirken.

Benötigte Daten und Informationen:

- Phosphorkonzentration im Ablauf und/oder P-Zulauffracht

2.3.2 Voraussetzungen und Anforderungen für die Umsetzung

In den in OSCAR betrachteten Schiffskläranlagen werden bisher lediglich die Parameter TS, DO-Konzentration, Temperatur im Bioreaktor und Trübung im Ablauf nach Membranfiltration (Permeat) online gemessen, sowie die Permeatmengen erfasst. Diese Parameter sind allein nicht ausreichend, um die Ablaufqualität direkt zu beurteilen und die Prozessführung zielgerichtet anzupassen (vgl. Abschnitt 2.3.1).

Ergänzend zu den Online-Messungen werden stichprobenartige Laboranalysen durchgeführt (Küvettentests für verschiedene Parameter, Messung von pH-Wert und Leitfähigkeit, Filtrierbarkeitstest etc.) und beobachtete Auffälligkeiten (bspw. ungewöhnliche Farbe, Geruch von Belebtschlamm oder Permeat) notiert. Für die Begleitanalytik gibt es bislang kein flottenweit standardisiertes/festes Messprotokoll. Die aufgenommenen Daten werden nicht systematisch abgelegt und analysiert und können entsprechend nur sehr eingeschränkt für den Anlagenbetrieb genutzt werden.

Um die Betriebsstrategien aus Abschnitt 2.3.1 umsetzen zu können und perspektivisch in die Anlagenautomatisierung einzubringen, fehlen Messungen von Ammonium (im Ablauf), Nitrat (in der Denitrifikationszone und/oder im Ablauf) und Phosphor (im Ablauf und/oder Zulauf). Ammonium und Nitrat können bspw. mit ISEn gemessen werden. Die Messung von Phosphor bzw. Ortho-Phosphat ist über einen nasschemischen Analysator möglich. Um die (Online-)Messwerte für eine gezielte Betriebsführung zu

nutzen, ist es wichtig, dass die Daten belastbar sind und ihre Verlässlichkeit eingeschätzt werden kann. Dazu können zum einen korrelierte Werte, die ggf. robuster (und günstiger) zu messen sind, zur Plausibilisierung herangezogen werden (bspw. Abgleich von Redoxpotenzial, DO- und NO_3 -Konzentration oder NH_4 -Konzentration und Leitfähigkeit). Zum anderen können die Werte mit Erwartungswerten abgeglichen werden, welche mit Beobachtermodellen berechnet wurden. Auf dieses Vorgehen wird ausführlich im Abschnitt 3.4 eingegangen.

Gemeinsam mit dem Projektpartner CMG wurde ein erweitertes Messkonzept erarbeitet, das für die Betriebsüberwachung sinnvolle Messungen umfasst. Weitere Informationen dazu können dem Abschlussbericht von CMG entnommen werden. Das Messkonzept wurde auf einem Schiff testweise umgesetzt (siehe Abschlussbericht von CMG) und in ähnlicher Form an der im Technikum des ISAH betriebenen Schiffskläranlage (siehe Abschnitt C.2) genutzt.

3 Elemente des OSCAR-PLS

Ausgehend von den in Kapitel 2 identifizierten Ansatzpunkten für die Betriebsunterstützung und -optimierung wurden folgende Elemente für das OSCAR-PLS konzeptioniert, entwickelt und erprobt:

- die Zusammenführung und Aufbereitung vorhandener Daten und Informationen zum Prozess- und Anlagenzustand (Abschnitt 3.1),
- digitale Zwillinge für die Speichertanks und die Schiffskläranlage:
 - Modellierungsansätze (Abschnitt 3.2),
 - Vorgehen zur Modellkalibrierung unter Berücksichtigung von Vorwissen und Unsicherheit (Abschnitt 3.3),
 - Nutzung als Beobachtermodelle zum Prozessmonitoring (Abschnitt 3.4),
 - Nutzung als Prognosemodelle für eine vorausschauende Betriebsführung (Abschnitt 3.5).

Weitere Anwendungsmöglichkeiten für die in den digitalen Zwillingen genutzten Modelle werden im Abschnitt 3.6 besprochen. Diese sind konkret die Nutzung:

- zur Mitarbeiterschulung,
- zur Entwicklung und Optimierung von Betriebs- und Regelungsstrategien,
- zur Planung von Anlagenum- und -neubauten,
- als Grundlage für die Weiterentwicklung der Abwasser- und organischen Reststoffbehandlung.

Hinweise zur praktischen Umsetzung finden sich im Abschnitt 3.7.

Zur Entwicklung, Implementierung und Erprobung des OSCAR-PLS wurde eine mit zusätzlicher Messtechnik ausgestattete Schiffskläranlage über 14 Monate im Technikum des ISAH betrieben. Zusätzliche Begleitversuche wurden an einer Laborkläranlage durchgeführt. Details zu den Anlagen und Versuchen finden sich in Anhang C.

3.1 Zusammenführung und Aufbereitung von Daten und Informationen zum Prozess- und Anlagenzustand

Die Zusammenführung und Bereitstellung von Daten zum Prozess- und Anlagenzustand in einer gemeinsamen digitalen Umgebung ist Kernelement des OSCAR-PLS und schafft die Voraussetzungen für die Berechnung vielfältiger zusätzlicher Informationen, von einfachen Verhältnis- und Kennwerten bis hin zu komplexen Datenauswertungen. Die systematische Ablage und einfache Bereitstellung der Betriebsdaten stellt auch für sich genommen bereits einen großen Mehrwert dar.

In OSCAR wurden folgende Arbeiten zur Umsetzung und Erprobung der Datenerfassung und -bereitstellung durchgeführt:

- Seitens des Projektpartners SEGNO wurde der IoT-Connector (abgeleitet von engl. *Internet of Things*, kurz IoT) zur Bündelung und Übertragung der Anlagendaten entwickelt und für die Nutzung mit der Cloud-Umgebung Siemens Mindsphere konfiguriert. Der IoT-Connector sowie die zugehörigen Cloud-Applikationen wurden an der Laborkläranlage des ISAH (siehe Anhang C.1) sowie an der im Technikum betriebenen Schiffskläranlage (siehe Anhang C.2) erprobt. Weitere detaillierte Informationen zum IoT-Connector und den Cloud-Applikationen sind dem Abschlussbericht von SEGNO zu entnehmen.

- Ergänzend wurde seitens des ISAH die Zeitreihendatenbank influxdb zusammen mit Grafana als Frontend zur Darstellung der Daten (beides Open-Source-Software) an der Schiffskläranlage im Technikum implementiert und getestet.

Details und Hinweise zur technischen Umsetzung finden sich in Abschnitt 3.7 sowie in Anhang D.

Kernaussagen

- Neben der Aufzeichnung von Online-Messwerten und Informationen zum Anlagenzustand aus dem PLS ist es sinnvoll, Ergebnisse von Laboranalysen, Beobachtungen und relevante Ereignisse (Betriebstagebuch) sowie Berechnungs-/Simulationsergebnisse in die zentrale Datenablage und -bereitstellung aufzunehmen.
- Die übersichtliche grafische Darstellung sowie der einfache Zugriff auf aktuelle sowie historische Daten erleichtern es, einen schnellen Überblick über den Anlagenzustand zu erhalten, Trends zu erkennen und Vergleiche zum vorangegangenen Betrieb zu ziehen.
- Durch den Fernzugriff auf die Daten und Informationen kann der Anlagenbetrieb von einer mit spezialisiertem Personal besetzten Leitwarte von Land aus gezielt unterstützt werden, bspw. in außergewöhnlichen Betriebsituationen.
- Die systematische und möglichst einheitliche Ablage und Aufbereitung der Daten verschiedener Schiffe einer Flotte vereinfacht es, den Betrieb der jeweiligen Anlagen zu vergleichen. Dadurch können Erfahrungswerte zu typischen Wertebereichen und Prozessverhalten gewonnen werden, Optimierungspotenziale erkannt und „best practices“ weitergegeben werden.
- Mittel- bis langfristig eröffnet die wachsende Sammlung von Daten zusätzliche Möglichkeiten der Datenanalyse, insbesondere hinsichtlich der Nutzung datengetriebener Methoden (Stichwort Machine Learning, künstliche Intelligenz).
- Die gesammelten Daten liefern nicht nur eine belastbare Grundlage für die Betriebsoptimierung, sondern auch für die Planung von Anlagen- und -neubauten.

Ein wesentliches Ziel des OSCAR-PLS ist die Verbesserung der Datenbasis für das Prozessmonitoring und die gezielte Betriebsführung. Grundlage dafür ist die Zusammenführung und systematische Ablage der vorhandenen Daten sowie die Bereitstellung von Schnittstellen zur Anzeige und zum Abruf der Daten (sowohl durch das Personal als auch durch Simulationsmodelle). Hauptanforderungen an die dazu genutzte digitale Umgebung sind:

- die zuverlässige und möglichst effiziente Ablage/Archivierung der Daten,
- die übersichtliche Anzeige der für das Prozessmonitoring und die Betriebsführung relevanten Daten,
- die Möglichkeit, Daten für die weitere Verwendung gezielt zu extrahieren,
- die Bereitstellung von Eingangsdaten für die Simulationsmodelle (digitale Zwillinge) (siehe dazu Abschnitt 3.7).

Das in OSCAR verfolgte Konzept sieht dabei vor, das oben beschriebene System als übergeordnetes, vom vorhandenen PLS unabhängiges System umzusetzen. Die relevanten Daten werden, soweit möglich, automatisiert aus dem Anlagen- bzw. Schiffs-PLS und ggf. weiteren Geräten (bspw. Messumformern, Servern) über gängige Industriekommunikationsprotokolle abgerufen. Weitere Daten, wie bspw. Ergebnisse von Laboranalysen oder Beobachtungen, werden über den Import von z. B. csv-Dateien oder über manuelle Eingaben in die Datenbank eingespeist.

Mit den in OSCAR erprobten Softwarelösungen konnten mit wenig Aufwand Dashboards erstellt werden, in denen bspw. der zeitliche Verlauf der in den jeweiligen Datenbanken abgelegten Daten interaktiv betrachtet werden kann. Bild 11 zeigt beispielhaft Screenshots der Zeitreihendarstellung von Anlagen- daten in der Siemens Mindsphere und in Grafana. Neben bzw. zusammen mit Messwerten können mit den Beobachter- und Prognosemodellen berechnete Werte in derselben Umgebung dargestellt werden, wodurch digitale Zwillinge nahtlos in das PLS integriert werden können. Durch die Anzeige von Soll- und Grenzwerten in der Zeitreihendarstellung (hier nicht gezeigt) können Abweichungen vom gewollten Betriebszustand leicht erkannt werden. Zudem können Benachrichtigungen und Alarmer anhand differenzierter Kriterien und Benachrichtigungsregeln ausgegeben werden. So können zusätzlich zu den im PLS der Anlage bzw. des Schiffes hinterlegten Warnungen und Alarmen weitere Benachrichtigungen anhand der (ggf. bereits weiterverarbeiteten) Daten konfiguriert werden, wobei auch komplexe Regeln für die Auslösung der Hinweismeldungen definiert werden können.

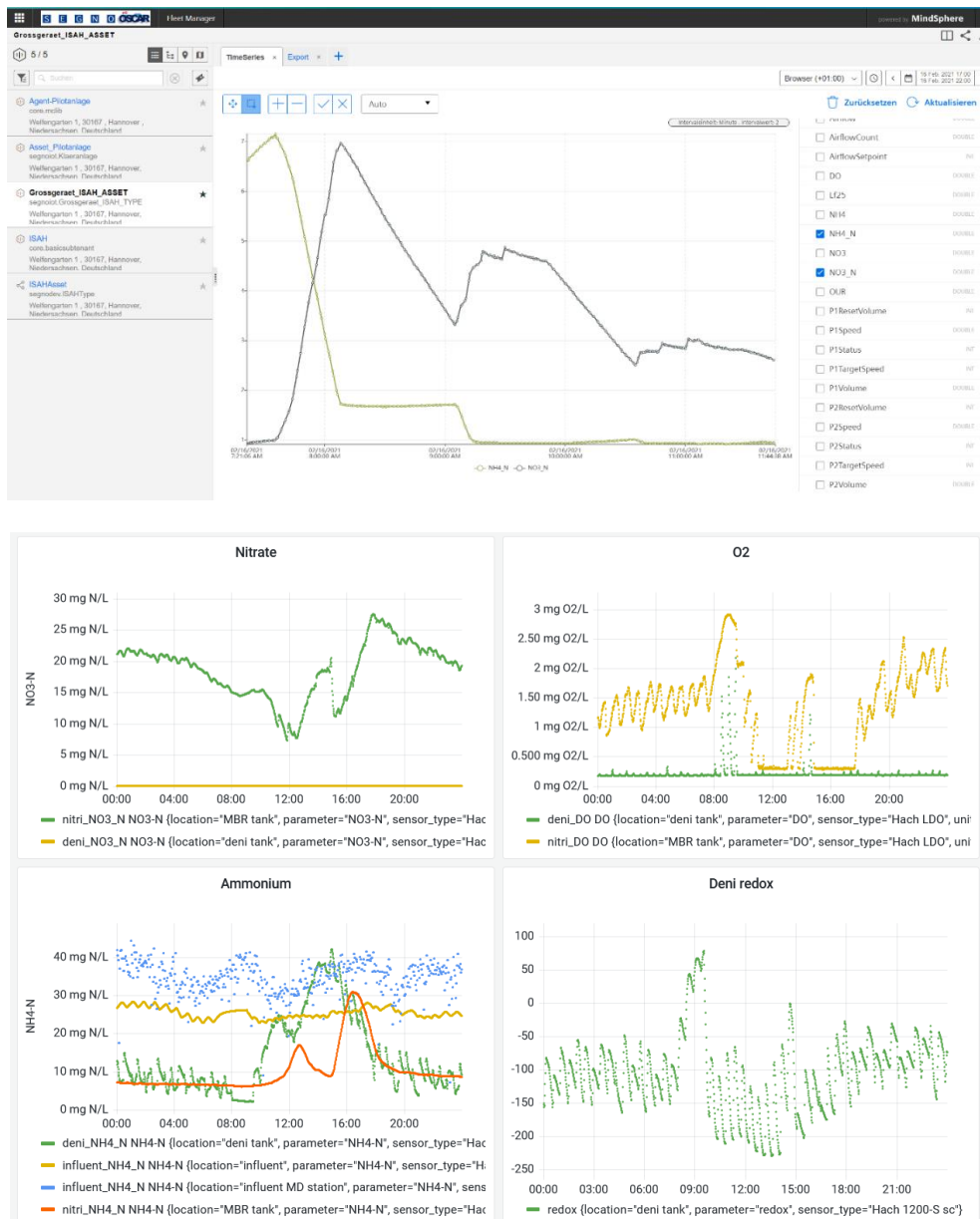


Bild 11 Screenshot der Zeitreihendarstellung von Messwerten in der Siemens Mindsphere (oben) und in Grafana (unten)

Über die Datenbank und die grafische Anzeige sind nicht nur aktuelle Messwerte, sondern auch archivierte Daten leicht zugänglich. Dies erlaubt die Erstellung langfristiger Trends (mit entsprechend aggregierten Werten) und die Betrachtung und Analyse vergangener Betriebssituationen, wodurch langfristige Veränderungen im Betrieb einfacher festgestellt werden können.

Die Daten können in gängigen Dateiformaten extrahiert werden, wobei die Zeiträume und zu extrahierenden Werte flexibel gewählt werden können. Zudem können die Daten über entsprechende Programmierschnittstellen (engl. *Application Programming Interface*, kurz API) aus anderen Programmen heraus abgerufen werden. Mit einer wachsenden Datenbasis stehen damit zunehmend auch Möglichkeiten der datengetriebenen Modellierung und Überwachung zur Verfügung (z. B. Machine Learning/Künstliche Intelligenz, Principal Component Analysis, Clusteranalyse etc).

3.2 Modellierungskonzept für die digitalen Zwillinge

Für die Abbildung des aktuellen Anlagenzustands und die Bereitstellung von Zustandsprognosen wurden in OSCAR geeignete Modellierungsansätze identifiziert, implementiert und erprobt. Das erarbeitete Modellierungskonzept wird im Folgenden vorgestellt.

Kernaussagen

- Angesichts der bisher geringen Verfügbarkeit historischer Prozessdaten und der im Allgemeinen besseren Übertragbarkeit auf andere (ähnliche) Anlagen bietet sich, zumindest zunächst, die Verwendung mechanistischer Modelle an. Dieser Ansatz wurde in OSCAR verfolgt.
- Aufgrund der unterschiedlichen Dynamik der relevanten Prozesse (vgl. Abschnitt 2.3) können verschiedene Modelle mit unterschiedlichen Zeitskalen zur Abbildung des Prozess- und Anlagenzustandes genutzt werden. In OSCAR wurden ein zeitlich eher grob aufgelöstes Modell für die Schlammmenge und -zusammensetzung sowie ein zeitlich höher aufgelöstes Modell mit Fokus auf die Nährstoffelimination implementiert und erprobt.
- Die als Eingangsdaten für die Modellierung benötigten Daten zum Kläranlagenzulauf können aus den vorhandenen Speichertankdaten (Tankfüllstände, Pumpenzustände, Durchflussmessungen) kombiniert mit typischen Werten der Teilstromzusammensetzung abgeschätzt werden.
- Für eine mittel- bis langfristige Vorhersage des Kläranlagenzustandes sowie zum vorausschauenden Zulaufmanagement ist eine Prognose der Zusammensetzung und Menge des Kläranlagenzulaufs erforderlich. Dafür wurde in OSCAR ein Modell entworfen, das den zu erwartenden Anfall der einzelnen Abwasserteilströme anhand verfügbarer Betriebsdaten abschätzt.

Aufgrund der bisher geringen Verfügbarkeit von (historischen) Betriebsdaten können in der aktuellen Forschung verbreitete datenbasierte Modellierungsansätze zum Prozessmonitoring, die bspw. auf der Nutzung statistischer Methoden oder maschinellen Lernens beruhen, bislang nur in begrenztem Maße auf Schiffskläranlagen angewendet werden. Daher wurde im Rahmen von OSCAR der Fokus auf mechanistische Modelle gelegt. Aufgrund der Interpretierbarkeit der Parameter mechanistischer Modelle können diese anhand von Erfahrungswerten und physikalisch sinnvollen Bereichen eingegrenzt werden. Ein weiterer Vorteil mechanistischer Modelle besteht darin, dass Parameter und Wertebereiche zwischen ähnlichen Anlagen tendenziell übertragbar sind bzw. Gründe für Abweichungen besser nachvollzogen werden können und ggf. relevante Informationen liefern (bspw. zum Zustand der Biozönose oder der Belüftungsaggregate). Da innerhalb einer Flotte oder seitens eines Anlagenherstellers meist

viele sehr ähnliche Anlagen betrieben werden, ist dieser Vorzug mechanistischer Modelle und Kennzahlen im vorliegenden Anwendungsfall besonders nützlich.

Bild 12 gibt einen Überblick über das Zusammenspiel der in OSCAR verwendeten Modellierungsansätze, die in den folgenden Abschnitten näher beschrieben werden.

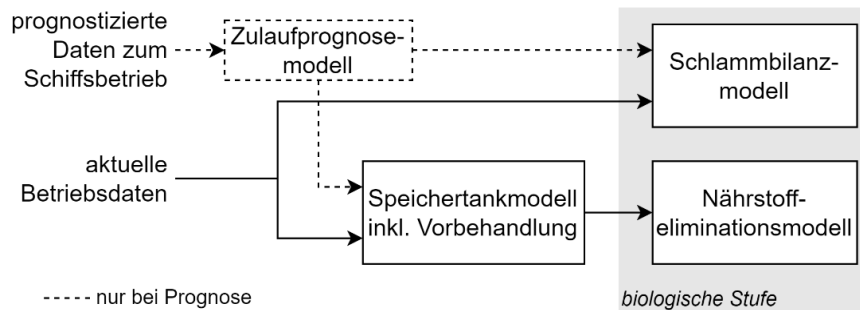


Bild 12 Übersicht der verwendeten Modellierungsansätze

3.2.1 Modellierung der biologischen Stufe

Da die relevanten Prozesse in der biologischen Stufe der Schiffskläranlage sehr unterschiedliche Dynamiken aufweisen, wurden für die Modellierung des Kläranalgenzustandes zwei Modellansätze mit unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen und Betrachtungszeiträumen gewählt:

- Das *Schlamm Bilanzmodell* bildet die langsameren Prozesse des Wachstums und Zerfalls der Biomasse sowie der Akkumulation inerter Feststoffe ab.
- Das *Nährstoffeliminationsmodell* dient in erster Linie zur Berechnung der schnelleren Prozesse der Stickstoffelimination und des Sauerstoffeintrags inkl. Mischvorgängen.

Beide Modelle basieren auf den Modellierungsansätzen der Belebtschlammmodelle (engl. *Activated Sludge Models*, kurz ASM) ASM1 bzw. ASM3 (Henze et al., 2015), die etablierte Berechnungsansätze für biologische Kläranlagen sind. Wesentliche Aspekte (Nutzen, berechnete Werte, benötigte Eingangsdaten usw.) werden im Folgenden erläutert. Weitere Details zu den Modellierungsansätzen können den Anhängen B.2 und B.3 entnommen werden. Die Erprobung der Modelle der biologischen Stufe erfolgte anhand der im Technikum des ISAH betriebenen Schiffskläranlage (siehe Anhang C.2).

Schlamm Bilanzmodell

Das Schlamm Bilanzmodell berechnet:

- die Menge an Belebtschlamm (Feststoffmasse) in der Anlage (kann über Volumen leicht in TS-Konzentration umgerechnet werden),
- den Anteil der aktiven Biomasse im Schlamm,
- das dynamische Schlammalter (nach Takács et al., 2008),
- die Schlammbelastung.

Die Berechnung erfolgt vor und nach dem Überschussschlammabzug bzw. mindestens als tägliche Werte.

Die vom Modell bereitgestellten Daten können genutzt werden:

- zur Unterstützung des Schlammmanagements (insbesondere für die vorausschauende Planung des Schlammabzugs),
- zum Abgleich mit TS-Messungen,
- zur Plausibilisierung der angesetzten Zulauffrachten,

- zur Überwachung der Aktivität der heterotrophen Biomasse.

Als Eingangsdaten werden benötigt:

- die Zulauffracht an abbaubarem CSB und inerten Feststoffen,
- der Überschussschlammabzug (Zeitpunkt und abgezogene Feststoffmasse),
- die Temperatur.

Im Rahmen von OSCAR wurde das Modell in der Programmiersprache Python implementiert.

In der in OSCAR verwendeten Variante bildet das Modell die heterotrophe Biomasse und die inerten Feststoffe ab. Bei Anlagen mit Phosphor-Fällung ist zusätzlich der Fällschlamm zu berücksichtigen. Eine Erweiterung des Modells um die Phosphor-Fällung und eine Phosphor-Bilanz ist leicht möglich. Treten zeitweilig sehr hohe CSB:N-Verhältnisse auf (> ca. 21 g abbaubarer CSB/g N im Kläranlagenlauf), sodass die gesamte Stickstofffracht in die heterotrophe Biomasse inkorporiert wird und den Nitrifikanten nicht zur Verfügung steht, bietet sich zusätzlich eine explizite Betrachtung der autotrophen Biomasse an. Hierfür kann das Modell um Wachstum und Zerfall der autotrophen Biomasse sowie eine N-Bilanz erweitert werden. Die explizite Betrachtung der autotrophen Biomasse kann auch zur Abschätzung der Nitrifikationskapazität genutzt werden.

Nährstoffeliminationsmodell

Das Nährstoffeliminationsmodell berechnet:

- die Konzentrationen von NO_3 , NH_4 , TN, CSB, TS sowie heterotropher und autotropher Biomasse (fraktioniert als ASM-Vektor),
- die DO-Konzentration oder Belüfterleistung,
- Umsatzraten der biologischen Prozesse,
- Reaktorfüllstände

in allen im Modell abgebildeten Bereichen und Stoffströmen der Anlage (Denitrifikationszone, Nitrifikationszone, Ablauf/Permeat, Überschussschlamm). Für das Prozessmonitoring (Beobachtermodell) bietet sich die Berechnung minütlicher Werte an. Zur Prognose können auch größere Zeitschritte verwendet werden, z. B. 15-min-Werte (je nach Fragestellung).

Die durch das Modell bereitgestellten Daten können genutzt werden:

- zur Unterstützung der Betriebsführung für die Stickstoffelimination,
- zum Abgleich der Messwerte für DO- und TS sowie NO_3^- , NH_4 und (indirekt) Redoxpotenzial,
- zum Abgleich von Füllstands- und Durchflussmessungen,
- zur Überwachung der biologischen Aktivität (v. a. Nitrifikanten),
- zur Plausibilisierung der angesetzten Zulauffrachten.

Als Eingangsdaten werden benötigt:

- Zulaufkonzentrationen von CSB, Stickstoff, Biomasse, Säurekapazität und DO, fraktioniert als ASM-Vektor,
- Volumenströme (Beschickung, Rezirkulation, Zulauf, Ablauf/Permeat, Überschussschlamm),
- Belüftungsrate oder DO-Konzentration,
- Temperatur.

Zur Implementierung des Modells wurde in OSCAR die Simulationssoftware SIMBA# genutzt.

Die Phosphor-Fällung ist in der hier verwendeten Form des Modells nicht direkt berücksichtigt, kann aber leicht ergänzt werden.

3.2.2 Modellierung des Kläranlagenzulaufs

Aktueller Zulauf

Die als Eingangsdaten für die Modellierung benötigten Daten zum Kläranlagenzulauf werden bisher nicht messtechnisch erfasst und können z. T. nicht online gemessen werden. Es sind jedoch Daten zur Entleerung der jeweiligen Speichertanks und der Kläranlagenbeschickung (Tankfüllstände, Pumpenzustände, Durchflussmessungen) verfügbar, aus denen die Zulaufzusammensetzung unter Ansatz typischer Werte der Teilstromzusammensetzung (vgl. Abschnitt 2.1.2) abgeschätzt werden kann. Die in Anhang A.2 zusammengestellten Daten können dabei als Grundlage für die Teilstromzusammensetzung herangezogen werden, wobei zusätzlich die Vorbehandlung (Fettabscheider, mechanische Stufe) zu berücksichtigen ist (siehe auch Abschnitt 2.1.2). Für das Schlambilanzmodell reichen Tageswerte der Zulaufmengen aus. Für das Nährstoffeliminationsmodell ist die kurzfristige Dynamik im Tagesverlauf relevant, weshalb ein hydraulisches Modell der Speichertanks vorzuschalten ist. Ein entsprechendes Modell, das leicht für die Nutzung als Online-Simulationsmodell angepasst werden kann, wurde zur Berechnung des Einflusses der Speichertanks auf die Dynamik des Kläranlagenzulaufs in Abschnitt 2.1.2 genutzt.

Zulaufprognose

Zur Prognose des Kläranlagenzulaufes wurde in OSCAR ein phänomenologisches Modell entwickelt, anhand dessen der Anfall von Abwasser und Speiseresten über den Tagesverlauf in Abhängigkeit der Betriebssituation (Anzahl Personen an Bord, Landgänge und Passagierwechsel, Betriebsabläufe Wäscherei usw.) abgeschätzt werden kann. Um die Vorhersage an die jeweils aktuellen Bedingungen anpassen zu können, dienen überwiegend möglichst leicht verfügbare Daten aus dem Schiffsbetrieb als Eingangsdaten (Passagierzahlen, Betriebszeiten der Wäscherei u. ä.). Das Prognosemodell ist modular aufgebaut: die Stoffströme sowie die Passagieraktivitäten werden jeweils in Teilmodellen berechnet, die zu einem Gesamtmodell – auch mit weiteren Modellmodulen für die Speichertanks und Behandlungsprozesse – verknüpft werden können. Durch die Möglichkeit der situations- und schiffsspezifischen Anpassung der Modellparameter und Modulverknüpfungen ist eine gute Übertragbarkeit auf fallspezifische Rahmenbedingungen verschiedener Schiffe gegeben. Eine ausführlichere Beschreibung der Modellierungsansätze findet sich im Anhang B.1.

Für den praktischen Einsatz des Prognosemodells im Betrieb sollten entsprechende Schnittstellen und organisatorische Abläufe geschaffen werden, die bereits im System vorhandene Werte (z. B. erwartete Passagierzahlen) mit dem Prognosemodell verknüpfen bzw. die Eingabe der benötigten Daten durch das Personal ermöglichen.

Aufgrund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit war im Rahmen von OSCAR nur eine begrenzte Modellvalidierung möglich. Die Vorhersagegenauigkeit und Praktikabilität sollten daher in zukünftigen Untersuchungen durch den Abgleich mit einer größeren Datenbasis sowie die praktische Nutzung weiter erprobt und ggf. verbessert werden. Eine Anpassung und Verfeinerung des Modells anhand eines größeren Datensatzes wäre durch den modularen Aufbau und die Parametrierbarkeit leicht möglich.

Neben der hier fokussierten Anwendung zur Prognose im laufenden Betrieb bietet das Modell potenziell auch großen Nutzen zur Auslegung neuer Anlagen sowie zur Verfahrensoptimierung. In diesem Zusammenhang kann das Modell genutzt werden, um Daten zu den zu erwartenden Mengen, Frachten und der Dynamik des Abwasseranfalls bereitzustellen.

3.3 Modellkalibrierung

Um möglichst gut passende Modelle zu erhalten, empfiehlt sich eine Kalibrierung derjenigen Modellparameter, die anlagen- bzw. abwasserspezifisch sind. Da – insbesondere im Rahmen des großtechnischen Anlagenbetriebs – oft nur begrenzte und ggf. ungenaue Referenzdaten für die Kalibrierung zur Verfügung stehen, wurde in OSCAR besonderes Augenmerk auf die Berücksichtigung von Vorwissen und Unsicherheit bei der Kalibrierung (und Simulation) gelegt. Das dabei verwendete Vorgehen wird im folgenden Abschnitt erläutert.

Kernaussagen

- Vorhandenes Wissen über zu erwartende Parameterwerte und Datenunsicherheiten können durch die Nutzung bayesscher Methoden direkt in die Modellkalibrierung einfließen. Zudem wird die verbleibende Unsicherheit bzgl. der kalibrierten Werte in Form von Häufigkeitsverteilungen quantifiziert und kann entsprechend bei der Einschätzung der Unsicherheit der Simulationsergebnisse berücksichtigt werden (bspw. über Monte-Carlo-Simulationen).
- Eine vor der Kalibrierung durchgeführte Sensitivitätsanalyse unter Nutzung der a-priori-Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Parameter und unsicheren Eingangsdaten lässt erkennen, welche Parameterwerte anhand des vorhandenen Datensatzes genauer eingegrenzt werden können, ob es Parameterabhängigkeiten gibt und welche Unsicherheiten einen maßgeblichen Einfluss haben. So kann bereits vor der eigentlichen Kalibrierung (qualitativ) eingeordnet werden, wie gut die Parameter anhand der vorhandenen Daten bestimmt werden können.

Aus der Analyse der Ausgangssituation an Bord (siehe Kapitel 2) wurde deutlich, dass i. d. R. wenige Daten zum Schiffskläranlagenbetrieb verfügbar sind. Die Möglichkeiten zur Aufnahme zusätzlicher Daten, sowohl im alltäglichen Betrieb als auch im Rahmen dedizierter Messkampagnen, sind ebenfalls stark beschränkt. Dies stellt eine besondere Herausforderung für die Modellkalibrierung dar. Für den Umgang mit einer unvollständigen und unsicheren Informationsgrundlage in der Modellierung sind bayessche Methoden ein nützliches Werkzeug, da sie die Berücksichtigung von vorhandenem Vorwissen ermöglichen und eine Abschätzung der nach der Kalibrierung verbleibenden Parameterunsicherheit liefern. Der dabei verfolgte Ansatz basiert auf dem Satz von Bayes:

$$p(\theta|y) \propto p(\theta)p(y|\theta) \quad (3.1)$$

worin $p(\theta|y)$ die gesuchte a-posteriori-Wahrscheinlichkeit der Parameterwerte θ (angesichts der beobachteten Daten y) darstellt, die proportional ist zur vorab zu spezifizierenden a-priori-Wahrscheinlichkeit der Parameterwerte $p(\theta)$ und der Wahrscheinlichkeit $p(y|\theta)$, dass die beobachteten Daten bei gegebenen Parameterwerten auftreten (Likelihood-Funktion). Für eine weitergehende Einführung in die bayessche Kalibrierung sei bspw. auf van Oijen (2020) verwiesen.

Im Folgenden wird das in OSCAR genutzte Vorgehen erörtert und am Beispiel der Kalibrierung des Schlamm Bilanzmodells für die im ISAH-Technikum betriebene Schiffskläranlage illustriert. Das hier erörterte Vorgehen eignet sich vor allem für die grundsätzliche Einengung der Parameterwerte im Rahmen vereinzelter, bei Bedarf durchgeführter Kalibrierungen. Sofern zeitlich veränderliche Parameter vorhanden sind, deren Veränderung im digitalen Zwilling berücksichtigt werden soll, können für die mitlaufende Bestimmung dieser Werte potenziell z. B. sequenzielle Monte-Carlo-Methoden oder Moving-Horizon-Schätzverfahren zum Einsatz kommen.

Das in OSCAR genutzte Vorgehen zur Modellkalibrierung umfasst die folgenden Schritte, die im Weiteren näher erläutert werden:

- Festlegung von a-priori-Wahrscheinlichkeitsverteilungen bzw. Spezifizierung der Unsicherheit für die nicht (exakt) bekannten Werte (Modellparameter, Eingangsdaten, Messwerte)
- Auswahl eines Referenzdatensatzes für die Kalibrierung
- optional:
 - a-priori-Simulation und Sensitivitätsanalyse (für den Referenzzeitraum und ggf. für längeren Zeitraum)
 - ggf. Vorauswahl zu kalibrierender Parameter
 - ggf. Anpassung des Referenzdatensatzes
- Festlegung der Likelihood-Funktion
- Kalibrierung (Berechnung der a-posteriori-Wahrscheinlichkeitsdichte der Parameterwerte)
- Überprüfung und Validierung der Kalibrierung

Festlegung der a-priori-Verteilungen

Im ersten Schritt sind für alle nicht (exakt) bekannten Werte mögliche Wertebereiche oder Wahrscheinlichkeitsverteilungen festzulegen (a-priori-Verteilungen). Dies kann bspw. anhand von Literatur- bzw. Erfahrungswerten, physikalischen Grenzen und/oder sachkundigen Einschätzungen erfolgen. Neben den Modellparametern können dabei auch unbekannte oder unsichere Eingangsdaten und Anfangswerte als zu kalibrierende bzw. in ihrer Unsicherheit zu berücksichtigende Größen betrachtet werden. Ist bspw. die CSB-Zulaufkraft nicht genau bekannt, kann diese in den Modellrechnungen mit einem Faktor multipliziert werden, um eine prozentuale Abweichung vom angesetzten Wert abzubilden. Für diesen Faktor wird dann ebenfalls eine Wahrscheinlichkeitsverteilung hinterlegt.

Zur Kalibrierung des Schlammbilanzmodells wurden die in Tabelle 3 beschriebenen a-priori-Verteilungen gewählt.

Auswahl eines Referenzdatensatzes für die Kalibrierung

Des Weiteren werden an der realen Anlage erhobene Messwerte als Referenzdaten benötigt. Welche Anforderungen an den Umfang der Daten (Anzahl/Auswahl der gemessenen Variablen), die Länge des Referenzzeitraumes und die zeitliche Auflösung bestehen, hängt zum einen von dem zu kalibrierenden Modell (Anzahl der Parameter, Modellkomplexität usw.) ab. Zum anderen spielt der Informationsgehalt der Daten eine Rolle. Bspw. sind für die Kalibrierung auf Differenzialgleichungen basierender dynamischer Modelle Daten aus einer Phase mit konstantem Betrieb i. d. R. weniger gut geeignet als Daten aus einer Phase mit veränderlichen Bedingungen.

Für die beispielhafte Kalibrierung des Schlammbilanzmodells wurden Daten von Tag 20 bis Tag 29 des Anlagenbetriebes genutzt. Aus den minütlichen Messwerten der TS-Sensoren wurden Tageswerte der durchschnittlichen TS-Konzentration (Gesamtmasse TS/Gesamtvolumen) als Referenzwerte berechnet.

Tabelle 3 Für die Kalibrierung des Schlamm Bilanzmodells festgelegte a-priori-Verteilungen der Parameterwerte

Parameter		a-priori-Verteilung					Ursprung der Werte
Symbol	Bezeichnung	Einheit	Typ	min	median	max	
Y_{OHO}	Ausbeutekoeffizient	$g_{CSB,BM}/g_{CSB}$	PERT	0,38	0,67	0,75	Literaturdaten
$b_{OHO,20}$	Sterberate	d^{-1}	PERT	0,2	0,33	0,4	Literaturdaten
θ_{OHO}	Temperaturkoeffizient der Sterberate	-	PERT	0,069	0,07	0,086	Literaturdaten
$i_{TS,Bio}$	TS-Gehalt der Biomasse	%/100	PERT	0,75	0,77	0,9	Literaturdaten
$X_{U,zu}$	Zulaufkonzentration inerter Feststoffe	g/m^3	Uniform	0		300	Erfahrungswerte
$X_{Bio,zu}$	Zulaufkonzentration Biomasse	g/m^3	Uniform	0		50	Schätzwert
f_{CSB}	multiplikativer Faktor der Abweichung der Zulauf-CSB-Konzentration vom erwarteten Wert	-	PERT	0,8	1	1,2	geschätzte Unsicherheit
f_{UES}	multiplikativer Faktor der Abweichung des Überschuss-schlammvolumens vom erwarteten Wert	-	PERT	0,8	1	1,2	geschätzte Unsicherheit
TSS_0	anfängliche TS-Konzentration	g/m^3	Uniform	4000		6000	Messwert
$\Gamma_{XBio,0}$	anfänglicher Anteil der Biomasse am Gesamt-TS	$g_{TS,Bio}/g_{TS}$	Uniform	0,1		0,4	Schätzwert

A-priori-Simulation und Sensitivitätsanalyse

Vor der eigentlichen Kalibrierung kann geprüft werden, wie gut das Modell die Referenzdaten grundsätzlich abbilden kann, und eine Einschätzung bzgl. der Kalibrierbarkeit der Parameter gewonnen werden. Dazu wird eine Reihe von Simulationsläufen durchgeführt, wobei die Eingangsdaten des Referenzzeitraumes verwendet und die Parameter über den vorab spezifizierten vermuteten/möglichen Wertebereich variiert werden (Monte-Carlo-Simulationen). Zur Auswertung kann die Bandbreite der berechneten Werte gemeinsam mit den Referenzdaten als Zeitreihe aufgetragen werden¹. Dies ist in Bild 13 für das Schlamm Bilanzmodell erfolgt. Darin ist zu erkennen, dass das Modell die Messwerte in dem betrachteten Zeitraum mit den gewählten a-priori-Verteilungen bereits gut abbildet, jedoch mit einer relativ großen Unsicherheit. Falls die Referenzdaten nicht (weitgehend) innerhalb der möglichen Bandbreite der Modellrechnungen liegen, kann das Modell die Daten nicht abbilden. Dann sollte geprüft werden, ob die a-priori-Verteilungen unpassend oder zu eng gewählt wurden, die Messwerte fehlerhaft sind oder das Modell ggf. angepasst werden muss (bspw. Berücksichtigung bisher vernachlässigter Prozesse/Effekte).

¹ Zusätzlich zum Referenzzeitraum kann auch der für die spätere Validierung genutzte Zeitraum genutzt werden, vgl. Bild 16a).

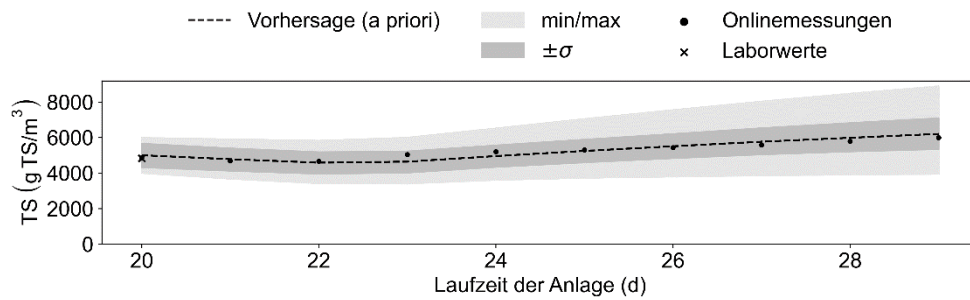


Bild 13 Mit den a-priori-Verteilungen der Parameter des Schlamm Bilanzmodells berechnete sowie gemessene TS-Konzentrationen im Referenzzeitraum

Ergänzend können zusammenfassende Metriken der einzelnen Rechenläufe, bspw. Median oder Extremwerte der Zeitreihen, gegen die variierten Parameterwerte aufgetragen werden, um eine grafische Sensitivitätsanalyse² durchzuführen. Daraus ist einfach zu erkennen, welchen Einfluss die einzelnen Parameter auf das Simulationsergebnis haben. Bild 14 illustriert dies am Beispiel des Schlamm Bilanzmodells. Der im Referenzzeitraum berechnete Maximalwert sowie der Median der TS-Konzentration werden bspw. überwiegend durch die anfängliche TS-Konzentration, die Zulaufkraft an inerten Feststoffen und, in geringerem Maße, dem anfänglichen Anteil der Biomasse am Gesamt-TS bestimmt. Ein Großteil der Parameter hat keinen oder nur einen diffusen Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Parameter mit geringem bzw. keinem Einfluss können anhand des betrachteten Zeitfensters voraussichtlich schlecht bzw. nicht kalibriert werden. Um den Rechenaufwand zu verringern, können diese Parameter bereits vorab von der Kalibrierung ausgeschlossen werden (Festlegung auf Nominalwert). Unter anderen Randbedingungen (außerhalb des Referenzzeitraumes oder auf längere Sicht) ist dennoch nicht auszuschließen, dass die scheinbar nicht sensitiven Parameter die Simulationsergebnisse in relevantem Maße beeinflussen. Daher sollten die Werte z. B. bei der Berechnung von Prognoseunsicherheiten (siehe Abschnitt 3.5) weiterhin als unsicher betrachtet und entsprechend variiert werden.

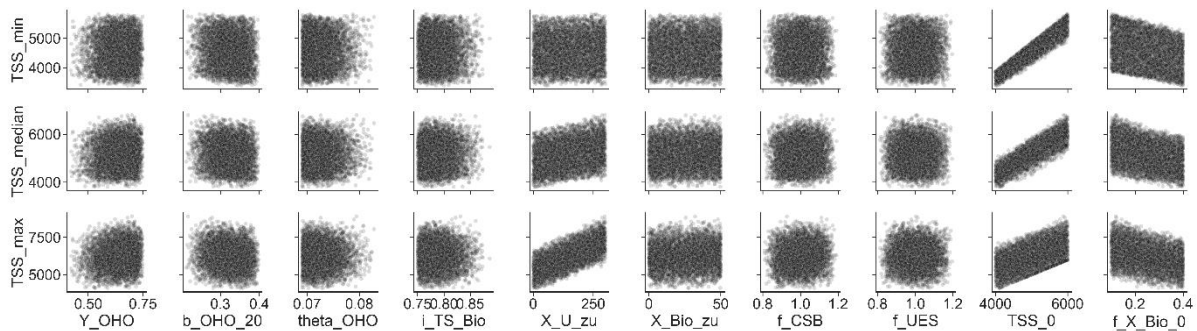


Bild 14 Berechnete Minimal-, Median- und Maximalwerte der TS-Konzentration in Abhängigkeit der Parameterwerte des Schlamm Bilanzmodells für den Kalibrierzeitraum (5000 Simulationen). Beschreibung der Parameter siehe Tabelle 3.

Festlegung der Likelihood-Funktion

Um die Übereinstimmung der mit dem Modell berechneten Werte mit den beobachteten Werten (Referenzdaten) zu quantifizieren, ist die Likelihood-Funktion festzulegen. Die Funktion ist frei wählbar und so zu definieren, dass größere Werte eine größere Übereinstimmung bedeuten. Eine häufig genutzte

² Alternativ oder in Ergänzung können auch Sensitivitätskoeffizienten berechnet werden.

Likelihood-Funktion, die auch in OSCAR verwendet wurde, ist z. B. die negative gewichtete Residuenquadratsumme:

$$\text{loglike} = -0,5 \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_{\text{sim},k,i} - y_{\text{beobachtet},k,i}}{\sigma_k} \right)^2 \quad (3.2)$$

worin $y_{\text{sim},k,i}$ und $y_{\text{beobachtet},k,i}$ den berechneten bzw. beobachteten Wert für die Variable k zum Zeitpunkt i bezeichnen und σ_k die Standardabweichung der Messung von Variable k . Eine ausführliche Übersicht möglicher Gütefunktionen findet sich bspw. in Hauduc et al. (2011b).

Kalibrierung

Im Zuge der Modellkalibrierung wird die Likelihood-Funktion für verschiedene Parameterkombinationen ausgewertet, um ein möglichst zutreffendes Bild der Übereinstimmung von Modell und Messwerten in Abhängigkeit der Parameterwerte zu erhalten (numerische Annäherung von $p(y|\theta)$). Dazu kommen spezielle Algorithmen (bspw. Markov-Chain-Monte-Carlo, Nested Sampling) zum Einsatz, die den durch die eingangs festgelegten Wahrscheinlichkeitsverteilungen definierten Parameterraum systematisch „durchkämmen“. In OSCAR wurde dazu das Python-Paket *UltraNest*³ genutzt. Die kalibrierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Parameterwerte (a-posteriori-Verteilung) ergeben sich schließlich aus der Überlagerung von $p(y|\theta)$ und den a-priori-Verteilungen $p(\theta)$ (siehe Gleichung (3.1)).

Überprüfung und Validierung

Der erste Schritt, um zu prüfen, ob die Kalibrierung erfolgreich war, ist die a-posteriori-Verteilungen der Parameterwerte mit den a-priori-Verteilungen zu vergleichen. Daran wird deutlich, welche Parameter im Rahmen der Kalibrierung genauer eingegrenzt werden konnten. Indem die Parameterwerte gegeneinander aufgetragen werden, kann zudem erkannt werden, ob es Abhängigkeiten zwischen den Parametern gibt (hängen zwei Parameter voneinander ab, ist keine eindeutige Kalibrierung dieser Werte möglich). Der in Bild 15 für das Schlamm Bilanzmodell gezeigte Cornerplot (basierend auf Foreman-Mackey, 2016) vereint beide Aspekte: die Parameterwerte sind im unteren linken Dreieck gegeneinander aufgetragen; auf der Diagonalen sind die einzelnen Wahrscheinlichkeitsdichten dargestellt (a-priori in grau, a-posteriori in schwarz). Daraus ist zu erkennen, dass nur für die Parameter $X_{U,zu}$ und TSS_0 ein deutlicher Informationszugewinn durch die Kalibrierung erzielt wurde. Die vorab durchgeführte Sensitivitätsanalyse hatte dies bereits vermuten lassen (vgl. Bild 14). Darüber hinaus zeigt sich eine leichte Abhängigkeit zwischen TSS_0 und dem anfänglichen Anteil der Biomasse.

³ <https://johannesbuchner.github.io/UltraNest/>

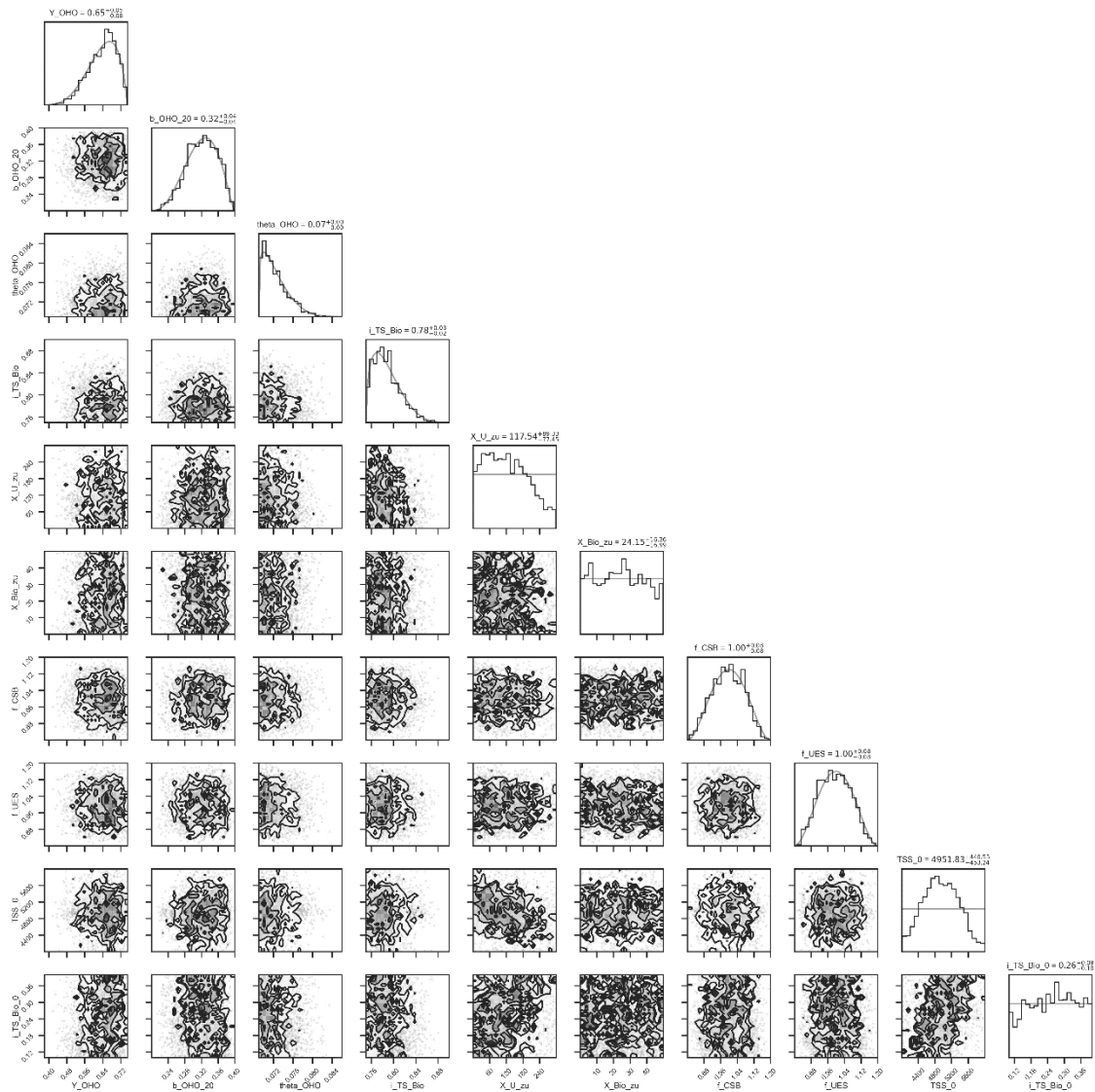
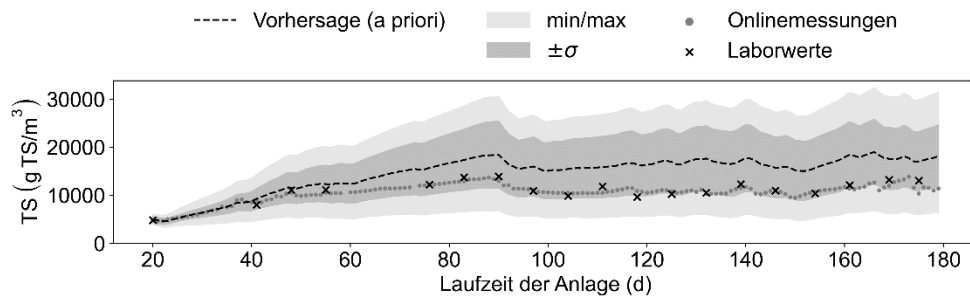
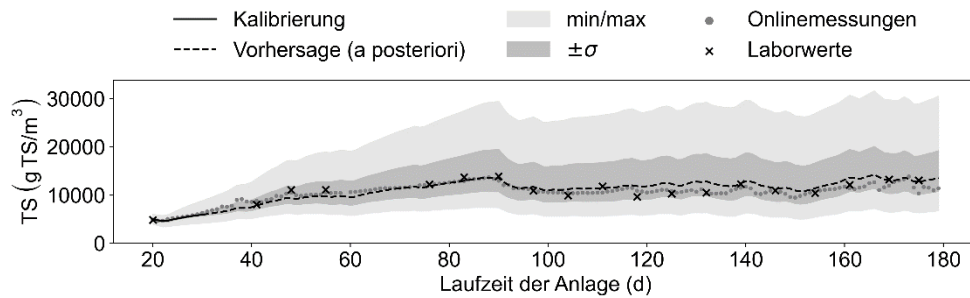


Bild 15 Cornerplot der Wahrscheinlichkeitsdichten der Kalibrierungsparameter des Schlamm Bilanzmodells (Reihenfolge der Parameter entspricht Tabelle 3)

Scheinen die Ergebnisse der Kalibrierung plausibel, werden die mit den kalibrierten Werten berechneten Bandbreiten der Simulationsergebnisse mit den beobachteten Werten zusammen aufgetragen und verglichen. Dabei sollte, wenn möglich, ein über den Referenzzeitraum hinausgehender Zeitraum betrachtet werden (Validierung), um sicherzustellen, dass das Modell grundsätzlich passt und nicht nur speziell an die Kalibrierdaten angepasst wurde (Überanpassung). Bild 16 zeigt die Bandbreite der berechneten TS-Konzentrationen und die gemessenen Werte für einen Zeitraum von 160 Tagen, von dem die ersten 10 Tage zur Kalibrierung genutzt wurden. Zum Vergleich wurden die Berechnungen mit den a-priori-Verteilungen (Bild 16a) vor Kalibrierung und den a-posteriori-Verteilungen (Bild 16b) nach Kalibrierung) durchgeführt. Obwohl nur zwei der Parameter durch die Kalibrierung genauer bestimmt werden konnten, passen die mit den a-posteriori-Verteilungen berechneten Werte deutlich besser zu den beobachteten Messwerten, auch über den zur Kalibrierung genutzten Referenzzeitraum hinaus. Zudem ist die Unsicherheit der simulierten Werte deutlich geringer (schmaleres $\pm\sigma$ -Band).



a) vor Kalibrierung



b) nach Kalibrierung

Bild 16 Berechnete sowie gemessene TS-Konzentrationen im Referenz- und Validierungszeitraum: a) mit a-priori-Verteilungen und b) mit a-posteriori-Verteilungen der Parameterwerte berechnet

3.4 Modellbasiertes Prozessmonitoring

Ziel des Prozessmonitorings ist es, die Datengrundlage für eine gezielte Betriebsführung zu liefern und Abweichungen vom gewollten Prozesszustand sowie Störungen erkennbar zu machen. In Ergänzung zur messtechnischen Erfassung des Prozess- und Anlagenzustandes werden durch die betriebsbegleitende Simulation (modellbasiertes Prozessmonitoring):

- zusätzliche Daten bereitgestellt, die messtechnisch nicht erfasst werden (können),
- durch den Abgleich mit Messwerten Probleme mit der Messtechnik sowie unerwartete Betriebszustände einfacher erkannt,
- eine vertiefte Prozessanalyse ermöglicht.

Grundlage des modellbasierten Prozessmonitorings ist die Abbildung des aktuellen Anlagenzustands in einem oder mehreren Simulationsmodellen (Beobachtermodelle). Die Modelle laufen in Echtzeit parallel zum Anlagenbetrieb mit und nutzen (ggf. vorverarbeitete) Daten aus dem PLS als Eingangsdaten.

Im Rahmen von OSCAR wurden zur Umsetzung des modellbasierten Prozessmonitorings Ansätze für die Einbindung der Simulation in den laufenden Betrieb erarbeitet. Zudem wurde die Echtzeit-Anbindung von Simulationsmodellen an der Schiffskläranlage im Technikum des ISAH erprobt.

Kernaussagen

- Gutes Prozessmonitoring ist eine wesentliche Voraussetzung für einen guten Betrieb. Online-Simulationsmodelle stellen eine sinnvolle Ergänzung zur messtechnischen Erfassung des Prozess- und Anlagenzustandes dar.

Kernaussagen

- Angesichts der begrenzten Möglichkeiten zur Durchführung von Zusatzanalytik und zur Kalibrierung und Wartung von Sensoren an Bord bietet der Abgleich berechneter Erwartungswerte mit den Messwerten eine zusätzliche Möglichkeit, die Verlässlichkeit der Messwerte (insbesondere von Online-Sensoren) einzuschätzen.
- Die direkte Berücksichtigung der Unsicherheit von Simulationsergebnissen und Messwerten hilft, die Belastbarkeit der Ergebnisse und die Relevanz von Abweichungen zwischen berechneten und beobachteten Werten schnell und intuitiv einzuschätzen. Um neben der Unsicherheit der Eingangsdaten auch die Unsicherheit der Modellparameter zu quantifizieren, können bayessche Methoden für die Modellkalibrierung genutzt werden. Das Vorgehen dazu wurde in OSCAR beispielhaft erprobt (siehe auch Abschnitt 3.3).
- Eine wesentliche Herausforderung bei der Nutzung von Simulationsmodellen zum Prozessmonitoring ist die Nachführung der Modelle (Anpassung des Modellzustands an den Anlagenzustand bei Abweichungen. Dafür muss zunächst entschieden werden, ob ein Messfehler oder eine Modellabweichung vorliegt. Im Falle einer Modellabweichung ist der Modellzustand neu festzulegen, wobei i. d. R. nicht alle Zustandsgrößen direkt bekannt sind. Für beide Schritte wurden in OSCAR verschiedene Ansätze betrachtet.
- Um aussagekräftige Berechnungsergebnisse zu erhalten, sind zuverlässige Eingangsdaten notwendig. Eine Plausibilitätsprüfung der Eingangsdaten und ggf. Bereitstellung von Ersatzwerten für als fehlerhaft eingestufte Werte sollte daher der eigentlichen Simulationsrechnung vorangehen. In OSCAR wurden dazu erste auf Schiffskläranlagen zugeschnittene Ansätze zur Prüfung und zum Ausgleich von Massenbilanzen erarbeitet.

Wesentliches Prinzip der Nutzung des digitalen Zwillings zum Prozessmonitoring ist, dass das Beobachtermodell den aktuellen Prozess- und Anlagenzustand widerspiegelt und damit Informationen zu dem zu erwartenden Verhalten des Prozesses sowie zusätzliche, nicht messtechnische erfasste Daten zum Anlagenzustand bereitstellt. Über den Abgleich der berechneten Werte mit an der Anlage gemessenen Referenzwerten können Messfehler und Abweichungen vom erwarteten Prozessverhalten erkannt werden. Abweichungen können aber auch darauf zurückzuführen sein, dass das Modell die Realität nicht exakt abbildet (nicht im Modell erfasste Prozesse, fehlerbehaftete Eingangsdaten etc.). Um sicherzustellen, dass der Zustand von Beobachtermodell und Anlage möglichst übereinstimmen, wird das Modell regelmäßig oder nach Bedarf an den Anlagenzustand angepasst (sog. Nachführung). Das grundsätzliche Vorgehen zur Modellinitialisierung, -nutzung und -nachführung ist in Bild 17 schematisch dargestellt und wird im Folgenden genauer erläutert.

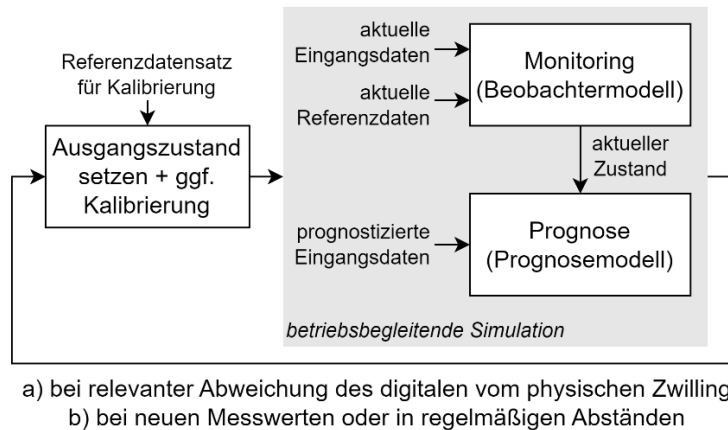


Bild 17 Schematische Darstellung des Vorgehens zur Abbildung und Prognose des Anlagenzustands mit dem digitalen Zwilling

Die Modelle werden zunächst mit einem zuvor an der Anlage erhobenen Referenzdatensatz kalibriert (für Details zur Kalibrierung siehe Abschnitt 3.3), um einen an die spezifische Anlage angepassten Parametersatz zu erhalten. Zum Start der betriebsbegleitenden Simulation (ebenso wie später zum Anpassen des Modellzustands an den Anlagenzustand) muss der Ausgangszustand (Initialwerte) des jeweiligen Modells anhand der vorhandenen Informationen zum Anlagenzustand festgelegt werden. Da die Zustandsgrößen im Modell (z. B. ASM-Vektoren) in der Regel nicht messbare bzw. nicht bekannte Größen enthalten, sind Methoden zur Erzeugung eines passenden Ausgangszustandes nötig. Dazu kann der Modellzustand aus den aktuellen Messwerten und passenden Annahmen erzeugt werden. Für das Schlamm Bilanzmodell kann bspw. der aktuelle TS-Messwert genutzt und der Anteil der aktiven Biomasse am Belebtschlamm abgeschätzt werden, um die beiden Zustandsgrößen inerte Feststoffe und Biomasse-Feststoffe festzulegen. Alternativ kann im Zuge der Kalibrierung der Ausgangszustand zu Beginn der für die Kalibrierung genutzten Zeitreihe bestimmt und von dort aus bis zum aktuellen Anlagenzustand gerechnet werden.

Sobald der Ausgangszustand und die Modellparameter festgelegt wurden, läuft das Beobachtermodell in Echtzeit parallel zum Anlagenbetrieb mit. Dabei werden die aktuellen Daten aus dem PLS der Anlage als Eingangsdaten in das Modell eingespeist, sodass dieses idealerweise den aktuellen Anlagenzustand abbildet. Das Beobachtermodell liefert zudem den Ausgangszustand für das Prognosemodell, das unter Nutzung prognostizierter Eingangsdaten Zustandsprognosen berechnet (siehe dazu Abschnitt 3.5).

Die berechneten Werte des Beobachtermodells werden fortlaufend mit aktuellen Messwerten⁴ (Referenzdaten) aus dem physischen Zwilling abgeglichen. Solange keine signifikanten Abweichungen zwischen Messwerten und berechneten Werten auftreten, gibt es zwei grundsätzliche Ansätze zur Fortsetzung der Berechnung:

- a) Das Modell läuft unverändert weiter.
- b) Mit jedem neuen Messwert (oder in regelmäßigen Abständen) wird der Modellzustand an die Messwerte angepasst. Dabei wird entweder der Messwert als neuer Zustand übernommen oder Messwerte und berechneter Wert werden (bspw. entsprechend der Unsicherheit/Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Werte) überlagert. Zusätzlich zum Zustand können auch die Parameterwerte angeglichen werden.

⁴ Denkbar ist auch ein Abgleich mit entsprechenden Werten, die über ein anderes Beobachtermodell berechnet wurden, z. B. Abgleich der TS-Konzentration aus dem Schlamm Bilanzmodell mit der TS-Konzentration aus dem Nährstoffeliminationsmodell.

Die regelmäßige, mitlaufende Anpassung des Modells an die Messwerte (b) ergibt in erster Linie dann Sinn, wenn die Messungen verlässlich sind und/oder das Modell das Prozessverhalten zwar kurzfristig gut abbilden kann, aber längerfristig Abweichungen auftreten. Auch bei zeitlich veränderlichen Modellparametern bietet sich dieses Vorgehen an (kontinuierliche Anpassung der Modellparameter anhand der Messwerte). Voraussetzungen für die Umsetzung sind die automatische Erzeugung des angepassten Modellzustandes sowie ggf. angepasster Parameterwerte anhand der (verlässlichen) Messwerte. Dazu können Methoden zur sogenannten Zustandsschätzung verwendet werden, bspw.:

- Kalman-Filter und daraus abgeleitete Methoden wie Extended Kalman-Filter oder Unscented Kalman-Filter,
- Sequenzielle Monte-Carlo-Methoden (sog. Partikelfilter),
- Moving-Horizon-Schätzverfahren.

Die Anwendung dieser Methoden für komplexere Modelle ist Gegenstand aktueller Forschung und zurzeit noch mit einem recht hohen zusätzlichen Aufwand zur Implementierung und Sicherstellung der gewünschten Funktionalität und Robustheit verbunden. Die Anwendung von Methoden zur Zustandsbeobachtung biologischer Kläranlagen könnte eine interessante Fragestellung für zukünftige Untersuchungen sein.

Treten beim Abgleich der berechneten Werte mit den Messwerten signifikante Abweichungen auf, deutet dies darauf hin, dass eine unerwartete Veränderung im Prozess aufgetreten ist (z. B. zugesetzte Belüfter, verminderte Nitrifikationsrate aufgrund von Hemmung etc.), die Eingangsdaten fehlerhaft sind oder ein Messfehler vorliegt. Möglich ist auch, dass das Modell bspw. aufgrund nicht darin berücksichtigter Prozesse/Phänomene den Prozessverlauf nicht korrekt abbilden konnte. Anhand des Modells können verschiedene Hypothesen bzgl. der Ursache der Abweichung getestet werden, um anschließend gezielte Maßnahmen zur weiteren Ursachenforschung (bspw. zusätzliche Messungen) oder Behebung erkannter Probleme zu ergreifen. Um mögliche Ursachen der Abweichung einzugrenzen, werden diejenigen Eingangsdaten oder Modellparameter, die im Verdacht stehen, von den im Beobachtermodell angesetzten Werten abzuweichen, so angepasst, dass das Modell die Messwerte besser widerspiegelt. So kann für verschiedene mögliche Ursachen berechnet werden, in welchem Maße eine Abweichung vom angesetzten/erwarteten Wert auftreten müsste, um die beobachteten Messwerte zu erklären. Wird bspw. eine unerwartet geringe TS-Konzentration gemessen, kann mit dem Schlamm Bilanzmodell geprüft werden:

- wie gering die CSB-Zulaufkraft gewesen sein müsste,
- wie gering die Zulaufkraft an inerten Feststoffen gewesen sein müsste,
- wie sehr die Sterberate erhöht und/oder die Wachstumsrate verringert gewesen sein müsste,
- wie viel Schlamm zusätzlich aus der Anlage hätte entnommen werden/entweichen müssen,

um die Abweichung zwischen Messwert und erwartetem Wert zu erklären. Auf Grundlage der so gewonnenen zusätzlichen Informationen kann das Betriebspersonal (vor Ort oder in der zentralen Leitwarte an Land) einordnen, ob die resultierenden Werte(kombinationen) realistisch sind und was dies für den Betrieb bedeutet, oder ob es wahrscheinlicher ist, dass die Messwerte fehlerhaft sind. Sofern eine signifikante Abweichung zwischen dem Modellzustand und dem tatsächlichen Anlagenzustand vorliegt, die nicht auf kurzfristige/vorübergehende Umstände (bspw. Wartungsarbeiten) oder Messfehler zurückzuführen ist, erfolgt eine erneute Angleichung des Modellzustandes an den Anlagenzustand sowie ggf. eine Nachkalibrierung der Modellparameter.

Eine Angleichung des Modells an den Anlagenzustand ist zudem immer dann erforderlich, wenn das Beobachtermodell neu gestartet werden muss, bspw. nach einer Kommunikationsunterbrechung zwischen PLS und Beobachtermodell mit Ausfall der Datenaufzeichnung⁵.

Zur Kalibrierung und Nachführung der in OSCAR verwendeten Modelle kommen grundsätzlich folgende Referenzdaten (Messwerte) in Frage:

- für das Schlamm Bilanzmodell:
 - TS-Masse, berechnet aus TS-Konzentrationen und Volumina – liegen üblicherweise als Onlinewerte vor
- für das Nährstoffeliminationsmodell:
 - Füllstände, DO-Konzentration (oder Belüfterleistung), TS-Konzentration – liegen üblicherweise als Onlinewerte vor
 - NH₄-, NO₃-Konzentration – Online-Messung möglich, aber nicht standardmäßig vorhanden
 - Redoxpotenzial als Indikator der NO₃- und DO-Konzentration in der Deni (nur zur Plausibilisierung nutzbar) – Online-Messung kostengünstig und robust, aber nicht standardmäßig vorhanden
 - CSB-Konzentration, Säurekapazität – Online-Messung aufwendig, nicht standardmäßig vorhanden

Die o. g. Parameter (außer Füllstand und Belüfterleistung) können auch über Laboranalysen oder Handmessgeräte stichprobenartig gemessen werden.

Durch den Abgleich der berechneten und gemessenen Werte können – neben Messfehlern – potenziell die folgenden Abweichungen erkannt werden:

- Schlamm Bilanzmodell:
 - abweichende Zulaufmengen (abbaubarer CSB und/oder inerte Feststoffe)
 - veränderte Wachstums- und/oder Sterberate der heterotrophen Mikroorganismen (z. B. aufgrund von Hemmung oder Toxizität)
 - Abweichungen beim Überschussschlammabzug oder anderweitiger Schlammverlust (z. B. durch Überschäumen)
- Nährstoffeliminationsmodell:
 - abweichende Zulaufmengen (insbesondere Stickstoff, CSB, inerte Feststoffe)
 - Veränderungen des Sauerstoffeintrags
 - veränderte Wachstums- und/oder Sterberate der heterotrophen und autotrophen Mikroorganismen (z. B. aufgrund von Hemmung oder Toxizität)
 - abweichende Volumenströme (inkl. Überschussschlammabzug) und/oder Füllstände

Zur Erprobung der digitalen Zwillinge wurden die Daten der im Technikum des ISAH betriebenen Schiffskläranlage (siehe auch Anhang C.2) genutzt. An der Anlage wurde zudem die technische Umsetzung der Echtzeit-Anbindung von Simulationsmodellen erprobt.

Bild 18 und Bild 19 zeigen beispielhaft die mit dem Schlamm Bilanzmodell berechneten und die mit Online-Sonden gemessenen TS-Konzentrationen der im ISAH-Technikum betriebenen Schiffskläranlage (Tageswerte für die mittlere TS-Konzentration der Gesamtanlage). Der Modellzustand wurde vor jedem Berechnungsschritt an den jeweils letzten Messwert angeglichen, wobei die aktive Biomasse über den zuletzt berechneten Anteil aktiver Biomasse am Gesamt-TS festgelegt wurde. Bei der Modellrechnung

⁵ Sofern die während eines Kommunikationsausfalls aufgelaufenen Eingangsdaten rekonstruiert werden können, kann die Historie vom letzten bekannten Zustand an nachgerechnet werden.

wurde die Unsicherheit der Modellparameter und Eingangsdaten berücksichtigt (Monte-Carlo-Simulation). Das hellgraue Band zeigt die berechneten Extremwerte (min/max). Das dunkelgraue Band stellt die innerhalb einer Standardabweichung ($\pm\sigma$) liegenden Werte dar. Für die Onlinemessungen ist ebenfalls die (hier beispielhaft abgeschätzte) Genauigkeit eingezeichnet. Die Berücksichtigung der Unsicherheit der berechneten Werte und der Messgenauigkeit erlaubt eine einfache und intuitive Einschätzung, welche Abweichungen auf tatsächliche Diskrepanzen hinweisen und genauer betrachtet werden sollten (durch Umkreisung hervorgehoben).

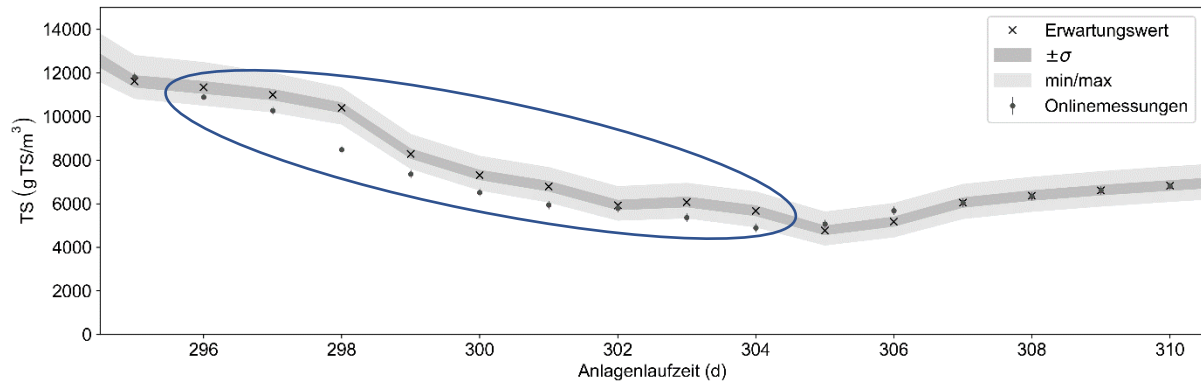
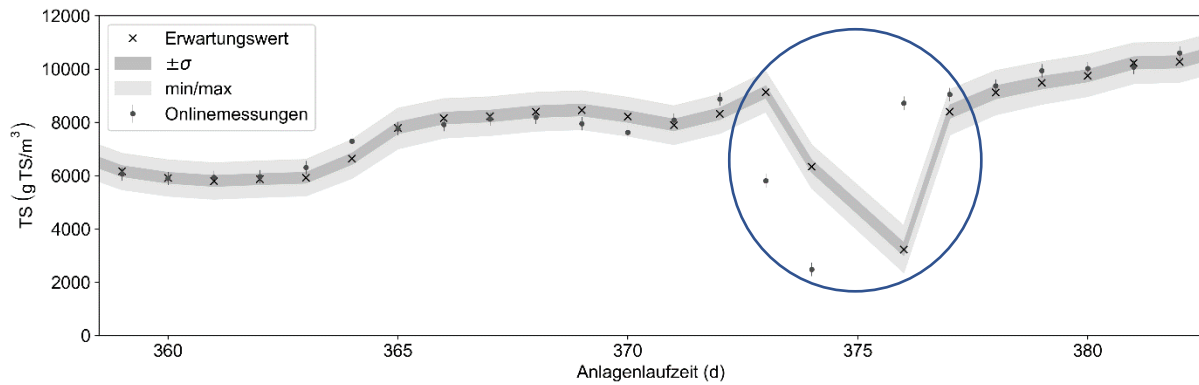
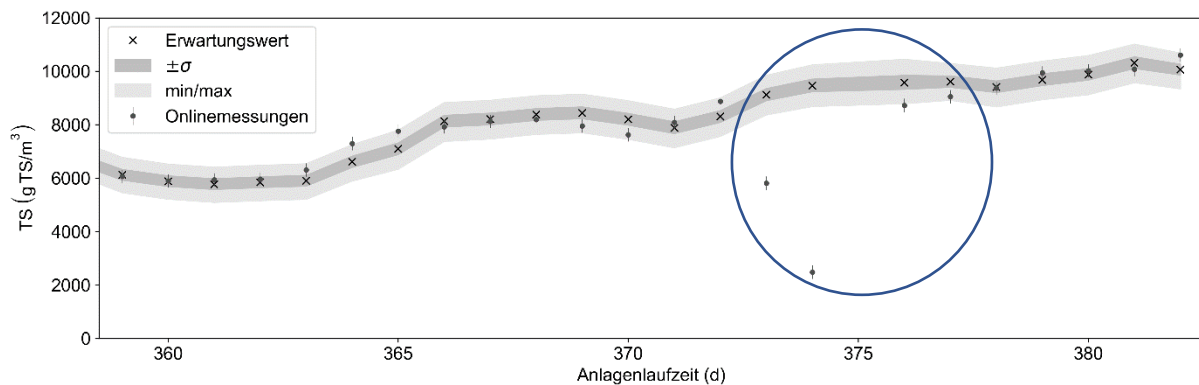


Bild 18 Vergleich von berechneten Erwartungswerten und Messwerten der TS-Konzentration inkl. Unsicherheit (Daten der Versuchsschiffskläranlage). Während der markierten Tage (Messwerte durchgehend geringer als Erwartungswerte) kam es mehrfach zu einem im Modell nicht erfassten Schlammverlust durch Überschäumen des Reaktors.

Bild 18 illustriert, wie durch die Berechnung von Erwartungswerten mit dem Modell eine unerwartete Abweichung im Betrieb erkannt werden kann. Während des dargestellten Zeitraums lagen die Messwerte an mehreren aufeinanderfolgenden Tagen unter den simulierten Werten und meist am Rand des min/max-Bandes oder außerhalb davon. In dieser Zeit war es zu einem (im Modell nicht erfassten) Verlust von Schlamm durch Überschäumen des Reaktors gekommen.



a) mit Angleich des Modellzustands an fehlerhafte Messwerte



b) unter Beibehaltung des vorherigen Modellzustands bei Messfehlern

Bild 19 Vergleich von berechneten Erwartungswerten und Messwerten der TS-Konzentration inkl. Unsicherheit (Daten der Versuchsschiffskläranlage). An den markierten Tagen ist die Auswirkung des Modellangleichs an fehlerhafte Messwerte zu erkennen.

Bild 19 a) veranschaulicht, wie sich das Angleichen des Modells an fehlerhafte Messwerte auf die weitere Berechnung auswirkt. An den ersten beiden Tagen des hervorgehobenen Bereiches traten aufgrund von Problemen an einer der TS-Sonden (schlechte Durchmischung/Zusetzen) Messfehler und entsprechend deutliche Abweichungen von den berechneten Werten auf. Durch das Angleichen des Modells an die fehlerhaften Messwerte sind die an den jeweils darauffolgenden Tagen berechneten Werte ebenso fehlerhaft. Sobald die Messung wieder zuverlässig funktioniert, wird der Fehler im Modell ebenfalls wieder ausgeglichen. Bild 19 b) zeigt für denselben Zeitraum den Verlauf der modellierten Werte, wenn kein Angleich des Modells an die fehlerhaften Messwerte erfolgt. Solange die Messung fehlerbehaftet ist, können die vom Modell berechneten Werte als Ersatzwerte verwendet werden. Sobald die Messung wieder korrekt funktioniert liegt der Messwert in der Nähe des berechneten Wertes, sodass davon auszugehen ist, dass die vorigen Rechenwerte plausibel sind. An diesem Beispiel zeigt sich deutlich, dass insbesondere bei größeren Abweichungen zwischen Modell und Messwert kritisch geprüft werden sollte, welchem Wert eher zu vertrauen ist. Dies kann manuell erfolgen (in Zusammenarbeit des Personals in der zentralen Leitwarte und an Bord), sofern nicht zu häufige Fehler/Abweichungen auftreten. Zur Unterstützung der Fehlersuche (und perspektivisch zur automatisierten Entscheidung) könnte das oben beschriebene Vorgehen der Anpassung der Modellparameter zur Prüfung verschiedener Hypothesen automatisiert werden, um mögliche Ursachen vorzuschlagen und ihre Wahrscheinlichkeit zu bewerten.

Bild 20 zeigt einen Screenshot des in SIMBA# aufgebauten Nährstoffeliminationsmodells der im ISAH-Technikum betriebenen Schiffskläranlage inkl. Abwassermisch- und -dosierstation. Die grün hinterlegten Blöcke dienen der Einspeisung aktueller Daten aus dem PLS der Anlage über ifakFAST (siehe Anhang D für weitere Informationen zur technischen Umsetzung).

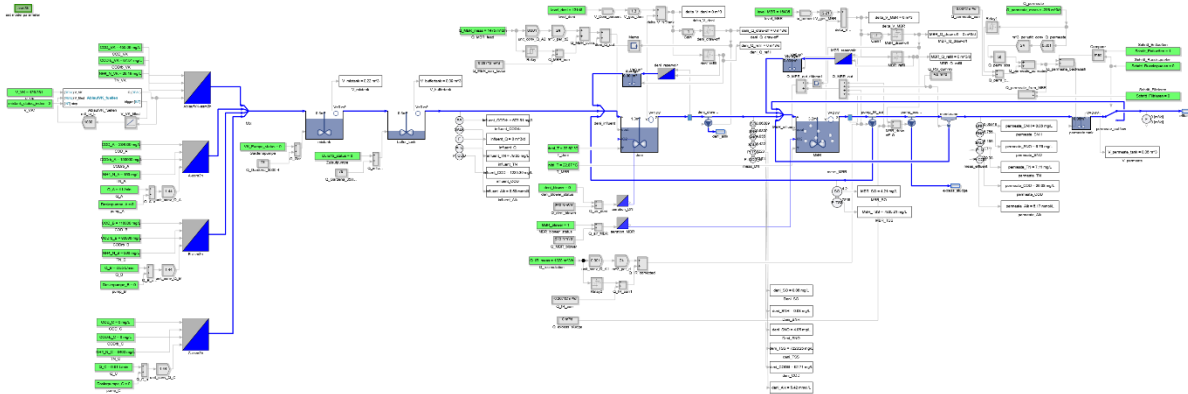


Bild 20 Screenshot des Beobachtermodells (Nährstoffeliminationsmodell) der im Technikum betriebenen Schiffskläranlage inkl. Abwassermisch- und -dosierstation. Grün hinterlegte Blöcke dienen der direkten Einspeisung von Daten aus dem PLS über ifakFAST.

Um die schnellen hydraulischen Vorgänge in der Anlage (Rückspülung der Membran, schnelle Befüllvorgänge) verfolgen zu können und die Füllstände korrekt wiederzugeben, wurde das Modell in 5 s-Zeitschritten ausgeführt (d.h. Aktualisierung der Eingangsdaten und Berechnung des neuen Zustandes alle 5 s). Um größere Zeitschritte zu ermöglichen und die Robustheit gegenüber Schwankungen der Durchflussmesswerte zu erhöhen, könnte statt der direkten Einspeisung der Durchflussmesssignale jeweils der mittlere Durchfluss des Zeitschritts aus dem (kleinschrittig) aufsummierten Durchfluss (Summenzähler) berechnet und als Eingangswert verwendet werden.

Für die möglichst korrekte Erfassung des Sauerstoffeintrags und die Plausibilisierung von gemessener DO-Konzentration und Belüftungsintensität gibt es zwei grundsätzliche Herangehensweisen. Wird der Messwert als verlässlich eingeschätzt, kann die gemessene DO-Konzentration als Sollwert im Modell vorgegeben werden. Um gleichzeitig die Belüftung und den Sauerstoffeintrag zu verfolgen, kann ein (in der Realität nicht vorhandener) Regler im Modell vorgesehen werden, der den Schlüsselparameter für den Sauerstoffübergang (hier: Produkt von α -Wert (Grenzflächenfaktor) und spezifischer Standard-Sauerstoffzufuhr) so anpasst, dass die gemessene DO-Konzentration bei der in der realen Anlage eingestellten Belüftungsintensität erreicht wird (vgl. Alex, Jumar und Tschepetzki, 1999, Bury et al., 2002). Abweichungen vom erwarteten Betrieb zeigen sich bei dieser Variante anhand von Veränderungen des vom Modell bestimmten Sauerstoffübergangs. Wird die DO-Messung als unzuverlässig eingeschätzt (oder ist nicht vorhanden), erfolgt die Berechnung der DO-Konzentration aus der Belüftungsintensität und den (anlagenspezifisch zu bestimmenden/festzulegenden) Sauerstoffübergangsparametern. Abweichungen können in diesem Fall über den Abgleich des DO-Messwerts mit dem simulierten Wert festgestellt werden.

Ein wesentliches Problem, das im Zuge der Echtzeit-Simulation mit dem Nährstoffeliminationsmodell auftrat, waren Massenbilanzfehler in den Eingangsdaten der im ISAH-Technikum betriebenen Schiffs-

kläranlage, die zu deutlichen Abweichungen der gemessenen und berechneten Füllstände und schließlich zu einem Über- bzw. Leerlaufen der Reaktoren im Modell, teilweise innerhalb weniger Tage, führten. Zur Lösung dieses Problems wurden verschiedene Ansätze verfolgt:

- Datenanalyse zum Aufdecken systematischer Fehler – Auswertung verschiedener Massenbilanzen, um den Ursprung der Abweichungen einzugrenzen
- Berechnung bzw. Berichtigung fehlerhafter (oder auch fehlender) Daten anhand zuverlässiger Daten – Nutzung von z. B. Kalman-Filter oder Regelkreisen zur Korrektur bzw. Ergänzung
- Harter Modellangleich – „Vernichtung“ oder „Erschaffung“ von Reaktorinhalt im Modell zum Angleich abweichender Füllstände

Grundsätzlich sollte zunächst untersucht werden, worauf die Abweichungen zurückzuführen sind, und wenn möglich die Ursache(n) behoben werden. Etwaige relativ einfach zu behebbende Ursachen sind bspw. unpassende oder falsche Skalierungen von Messsignalen (z. B. bei der Übertragung von Analogsignalen und Umrechnung in physikalische Messwerte) oder schlecht kalibrierte Sensoren. Ein nicht so einfach zu behebbendes Problem sind abrupte Änderungen/Spitzen der Messsignale, die bspw. durch das Ein- und Ausschalten von Pumpen oder Schalten von Ventilen hervorgerufen werden können. Da auch tatsächliche schnelle Änderungen (zumindest der Durchflüsse) auftreten können, können diese nicht einfach mit bspw. einem Tiefpass herausgefiltert werden. Eine weitere zu berücksichtigende Schwierigkeit bei der Verwendung von Füllstandsdaten sind Füllstandsänderungen, die durch Änderungen der Belüftung verursacht werden (Gas-Holdup).

Als fehlerhaft eingestufte Daten können ggf. aus den verbleibenden Daten berechnet werden. Dafür empfiehlt sich die Nutzung von Kalman-Filtern oder auf einfachen Regelkreisen beruhenden Beobachtermodellen (vgl. oben beschriebenes Vorgehen für Belüftung und DO-Konzentration).

Eine weitere Option ist die Anpassung der Reaktorfüllstände an gemessene Werte durch die „Vernichtung“ oder „Erzeugung“ von Reaktorinhalt im Modell. Dabei wird Reaktorinhalt mit der aktuellen Zusammensetzung hinzugefügt oder abgezogen (unter Nutzung einer in der Realität nicht vorhandenen Quelle bzw. Senke). Bei geringen Bilanzfehlern kann dies ein pragmatischer Ansatz zur Modellnachführung sein. Bei größeren Bilanzfehlern besteht das Risiko, dass die Zusammensetzung des Reaktorinhalts im Modell nicht korrekt wiedergespiegelt wird und die Simulationsergebnisse dadurch verfälscht werden.

Für die in OSCAR betrachtete Anlage konnten mehrere Diskrepanzen in den Daten erkannt und z. T. die Ursachen identifiziert werden. Eine vollständige Aufklärung der Hintergründe der Fehler war jedoch im Rahmen des Projektes nicht möglich. Es ist davon auszugehen, dass der Ausgleich von Massenbilanzen auch an anderen Anlagen notwendig sein kann (wenn auch nicht im selben Maße und/oder aufgrund anderer Ursachen). Daher ist die Entwicklung geeigneter Methoden zur Fehlersuche und -behebung sowie zur Vorverarbeitung von Massenbilanzdaten für Anlagen mit variablen Füllständen eine wichtige Voraussetzung für die Praktikabilität von Beobachtermodellen, die hydraulische Vorgänge in der Anlage abbilden. Insgesamt ist festzustellen, dass in der Literatur (vorrangig für Anwendungsfälle aus anderen Fachbereichen) bereits zahlreiche Ansätze und Methoden zur Detektion systematischer Fehler und zum Ausgleich von Fehlern in Messwerten allgemein und in Massenbilanzen im Speziellen existieren. Für den vorliegenden Anwendungsfall haben sich bisher keine praktikablen Methoden zur Vorverarbeitung der Durchfluss- und Füllstandsdaten (in Echtzeit) etabliert, da diese Fragestellung erst im Zusammenhang mit der betriebsbegleitenden Modellierung an Relevanz gewinnt. Hier besteht also noch weiterer Bedarf, vorhandene Methoden zu erproben und anzupassen oder auch neue Ansätze zu entwickeln.

3.5 Prognoserechnungen

Prognoserechnungen unterstützen den Betrieb:

- indem sich anbahnende unerwünschte Prozesszustände/Betriebssituationen frühzeitig erkannt und ggf. präventive Maßnahmen eingeleitet werden können,
- indem die geplante Betriebsführung vorab simuliert und ggf. optimiert werden kann,
- perspektivisch als Teil modellprädiktiver Regler.

Um diese Potenziale für den Schiffskläranlagenbetrieb nutzbar zu machen, wurden in OSCAR Ansätze zur Einbindung von Prognosen in den laufenden Betrieb erarbeitet und für die in OSCAR verwendeten Modellansätze konkretisiert. Ein besonderes Augenmerk lag auf der Berücksichtigung von Unsicherheit in den Prognosen.

Kernaussagen

- Konkrete Nutzungsmöglichkeiten der Prognose für das Zulaufmanagement und den Schiffskläranlagenbetrieb sind bspw.:
 - die vorausschauende Planung des Schlammabzugs unter Berücksichtigung des Kläranlagenzustands und der Möglichkeiten zur Schlammstorage und -abgabe,
 - die vorausschauende Planung der Zeiten der organischen Reststoffbehandlung, zur gezielten Vermeidung von Frachtspitzen in Zeiten ohnehin hoher Frachten oder auch zur gezielten Zugabe von CSB aus Speiserestpresswasser zur Unterstützung der Denitrifikation, sowie gleichzeitigen Nutzung möglichst umweltfreundlicher Entsorgungswege,
 - zur frühzeitigen Erkennung der Notwendigkeit von Anpassungen der Betriebseinstellungen (Belüftung, Rezirkulation, Fällmitteldosierung).
- Für die Vorhersage des Kläranlagenzustandes können im Wesentlichen die gleichen Modelle wie für das modellbasierte Prozessmonitoring verwendet werden, sodass eine gute Synergie zwischen beiden Aspekten der Betriebsunterstützung gegeben ist.
- Die Berücksichtigung des Einflusses der Unsicherheit von prognostizierten Eingangsdaten und Modellparametern auf die Prognose ermöglicht, die Zuverlässigkeit der Vorhersagen einzuordnen. Durch eine Sensitivitätsanalyse kann festgestellt werden, welche Daten zur weiteren Eingrenzung der Unsicherheit nötig wären und welche Randbedingungen einen besonders großen Einfluss auf den Prozessverlauf haben.

Zur Einbindung von Prognoserechnungen in den Betrieb bieten sich verschiedene Ansätze an, die auch parallel genutzt werden können:

- a) regelmäßige, automatisierte Betriebsprognosen (ohne Betriebseingriff),
- b) manuell veranlasste und konfigurierte Prognosen,
- c) Prognosen als Teil einer modellprädiktiven Regelung.

Ziel der automatisch mitlaufenden Prognosen ist in erster Linie die frühzeitige Erkennung sich anbahnender problematischer Betriebssituationen, die ein Eingreifen in den Betrieb erfordern. Dabei wird angenommen, dass manuell veränderbare Betriebseinstellungen⁶ gegenüber dem aktuellen Zeitpunkt unverändert bleiben. Für den Zulauf werden prognostizierte Daten angesetzt⁷ (siehe auch Zulaufprognosemodell in Abschnitt 3.2.2). Wird in der Prognoserechnung festgestellt, dass mit Abweichungen vom Sollbetrieb zu rechnen ist, wird das Betriebspersonal informiert (Warnung/Alarm). Ergänzend können über eine Optimierungsrechnung Vorschläge für eine angepasste Betriebsführung erstellt werden.

Manuell angestoßene Prognosen dienen der Vorabsimulation der geplanten Betriebsführung, um diese zu überprüfen und ggf. anzupassen. Dies ist insbesondere für manuell durchzuführende Betriebseingriffe nützlich, bspw. zur Planung des Überschussschlammabzugs oder zur (zurzeit noch manuell stattfindenden) Einstellung des Permeatvolumenstroms. Der Prognosehorizont kann dabei frei gewählt und die geplanten Betriebseingriffe vorgegeben werden. Prinzipiell können auch hier Vorschläge für die Betriebsführung über eine computergestützte Optimierung erzeugt werden.

Prognosen können zudem in der automatisierten Regelung genutzt werden (sog. modellprädiktive Regelung). Ähnlich wie für die Planung der manuellen Betriebsführung werden der zukünftige Betriebsablauf dazu vorab simuliert und über Optimierungsrechnungen ideale Regeleingriffe bestimmt, die im Falle der modellprädiktiven Regelung jedoch direkt übernommen werden (ohne manuelle Intervention). Die Prognose und Anpassung der Regeleingriffe erfolgt dabei automatisch in regelmäßigen Abständen für einen festen Zeithorizont.

Zur Prognose können prinzipiell dieselben Modellierungsansätze wie für die Beobachtermodelle verwendet werden, jedoch mit kleinen Unterschieden im Modellaufbau. Die Prognosemodelle nutzen prognostizierte/vorgegebene zukünftige Werte als Eingangsdaten (statt aktueller Werte aus der Anlage). Zudem muss die für den jeweiligen Prognosezweck relevante Automatisierung/Regelung im Prognosemodell abgebildet werden. Dies ist im Beobachtermodell i. d. R. nicht erforderlich, da die Aktorsignale oder korrespondierende Messwerte direkt in das Modell eingespeist werden. Für die modellprädiktive Regelung können je nach Dynamik der zu regelnden Prozesse und Regelantworten zusätzliche Anforderungen an die Modelle bestehen bspw. hinsichtlich der Rechenzeiten für die Optimierung, die ggf. Modellvereinfachungen erfordern, um hinreichend schnell durchgeführt werden zu können.

Für den konkreten Anwendungsfall der Schiffskläranlagen ergeben sich mit den in OSCAR genutzten Modellierungsansätzen (siehe Abschnitt 3.2) bspw. folgende Anwendungsmöglichkeiten:

- Planung des Schlammabzugs unter Beachtung der Möglichkeiten zur Schlammspeicherung und -entsorgung,
- Wahl an die zu behandelnde Abwassermenge und erwarteten Zulauffrachten angepasster Betriebseinstellungen (Permeatvolumenstrom, Belüftungsintensität, Rezirkulation),
- frühzeitige Erkennung von Frachten, die die Behandlungskapazität übersteigen würden.

Die vorausschauende Planung des Schlammabzugs wird durch Prognoserechnungen mit dem Schlamm Bilanzmodell unterstützt, indem das resultierende Schlammalter und der TS anhand erwarteter Zulauffrachten sowie dem geplanten Überschussschlammabzug für mehrere Tage im Voraus berechnet werden. Dadurch kann frühzeitig erkannt werden, ab wann bspw. zu hohe TS-Gehalte und/oder unerwünscht geringe Schlammbelastungen (Schaumgefahr) erreicht würden. Der Schlammabzug kann vo-

⁶ Die vorhandene Automatisierung, Regelkreise usw. sind im Prognosemodell abgebildet.

⁷ Bei Prognosen mit kurzem Vorhersagehorizont kann alternativ auch von einem gleichbleibenden Zulauf ausgegangen werden. Ob diese Vereinfachung zielführend ist, hängt von der Zulaufdynamik und dem Zweck der Prognose ab und sollte im Einzelfall während der Modellentwicklung/-konfiguration geprüft werden.

rausschauend so geplant werden, dass die je nach Betriebsstrategie gewünschten Betriebsbedingungen möglichst gut eingehalten werden und möglichst umweltfreundliche Schlammabgabemöglichkeiten genutzt werden. So kann beispielsweise rechtzeitig vor einer Phase, in der kein Schlammabzug möglich ist, entsprechend mehr Schlamm abgezogen werden und dabei beachtet werden, dass das erforderliche Mindestschlammalter nicht unterschritten wird.

Über das Zulaufprognosemodell kann der zu erwartende mittlere Abwasseranfall abgeschätzt und als Orientierung für die Einstellung des Permeatvolumenstroms verwendet werden. Bei größeren Schwankungen des Abwasseranfalls kann es vorkommen, dass bei konstantem Abzug des mittleren Abwasseranfalls als Permeat die Sollfüllstandsbereiche der Speichertanks und/oder Kläranlage nicht eingehalten werden. Um dies vorab zu prüfen, kann das Nährstoffeliminationsmodell (oder auch ein einfaches hydraulisches Modell der Kläranlage), zusammen mit dem vorgeschalteten Speichertankmodell, genutzt werden. Zudem kann mit dem Nährstoffeliminationsmodell für einige Stunden im Voraus geprüft werden, ob die aktuelle/geplante Belüftung (Intensität und/oder Taktzeit) voraussichtlich für einen ausreichenden und nicht unnötig großen Sauerstoffeintrag sorgen und ob die aktuelle/geplante Rezirkulation zu einer guten Ausnutzung der Denitrifikationskapazität und nicht zu großen Sauerstoffverschleppung führen wird. Da mit dem Nährstoffeliminationsmodell auch die zu erwartenden Ablaufwerte (CSB-, NH_4 -, NO_3 -Konzentration) berechnet werden, können drohende Überschreitungen der geforderten Ablaufwerte ebenfalls frühzeitig erkannt und ggf. entsprechende Gegenmaßnahmen (Anpassung der Betriebseinstellungen und/oder des Zulaufs) ergriffen werden.

Um die Belastbarkeit und Relevanz der prognostizierten Daten einschätzen zu können, empfiehlt sich die Berücksichtigung der Unsicherheit der Modellparameter und prognostizierten Eingangsdaten bei den Prognoserechnungen (bspw. über Monte-Carlo-Simulation). Typischerweise nimmt die Unsicherheit zu, je weiter in die Zukunft prognostiziert wird (sog. Prognosetrichter). Bild 21 illustriert dies anhand einer mit dem Schlamm Bilanzmodell durchgeführten beispielhaften Prognoserechnung. Die verwendeten Eingangsdaten zeigt Bild 22. In den Diagrammen sind neben dem Median (gestrichelte Linie) die Extremwerte der Eingangsdaten und Berechnungsergebnisse als hellgraues Band (min/max) dargestellt. Die innerhalb einer Standardabweichung liegenden Daten befinden sich im Bereich des dunkelgrauen Bandes ($\pm\sigma$).

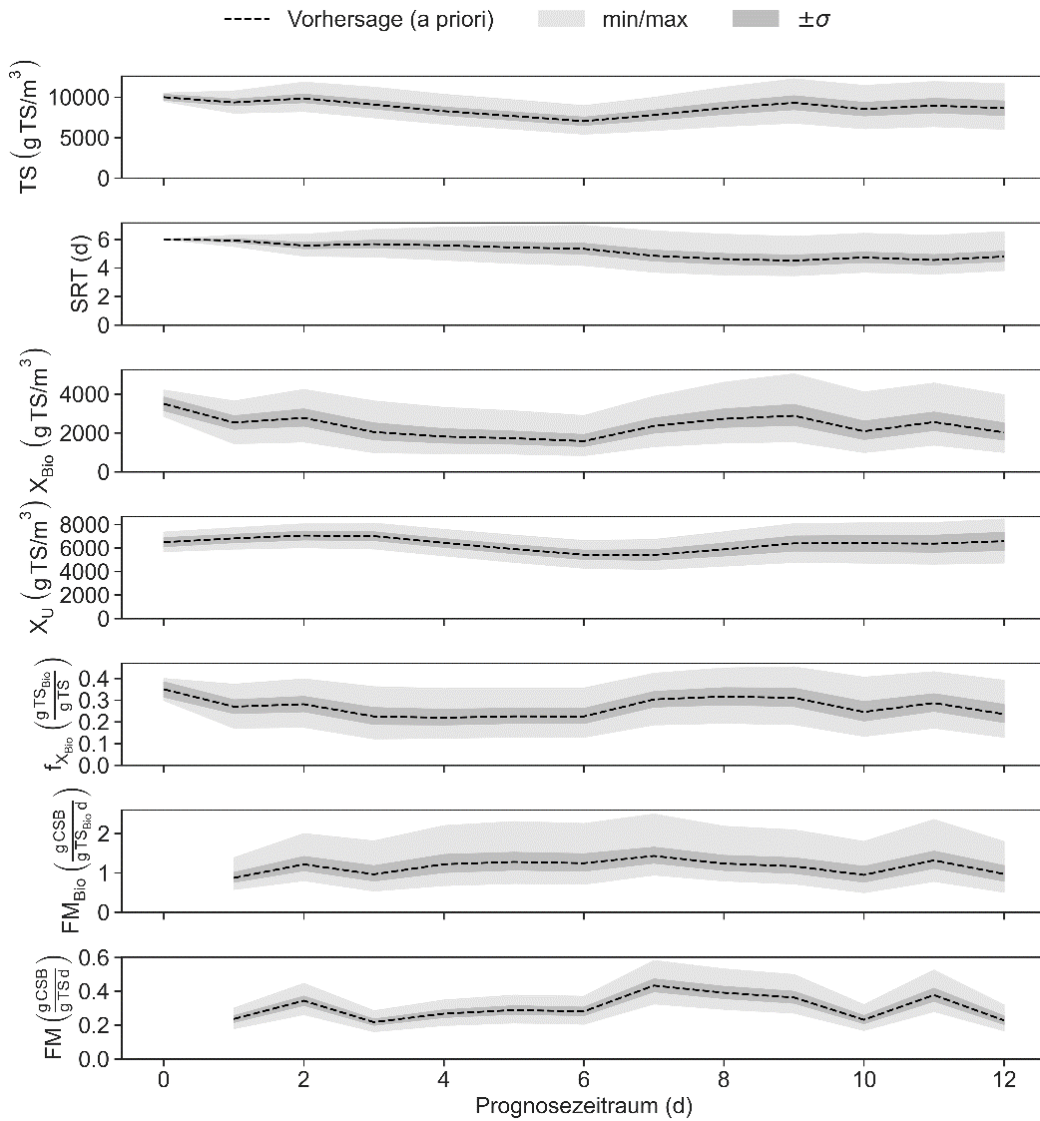


Bild 21 Beispielergebnis für eine Prognoserechnung mit dem Schlamm Bilanzmodell . Von oben nach unten: Schlammalter (SRT), aktive Biomasse-Konzentration (X_{Bio}), inerte Feststoffkonzentration (X_U), Anteil der aktiven Biomasse am Gesamt-TS (f_{X_{Bio}}), Schlammbelastung pro Biomasse-TS (FM_{Bio}) und Schlammbelastung pro TS (FM).

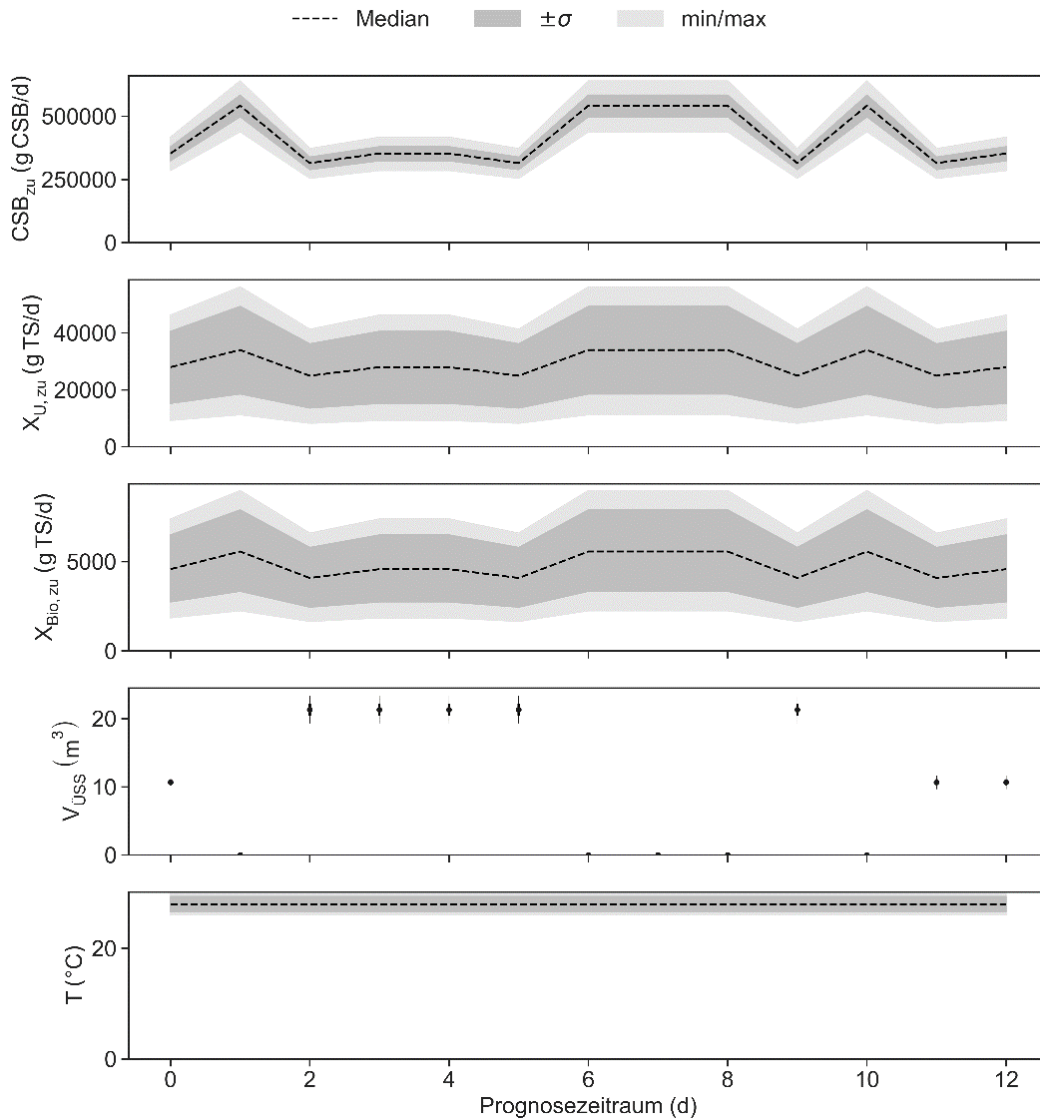


Bild 22 Eingangsdaten der in Bild 21 dargestellten Prognoserechnung . Von oben nach unten: Zulauf-
fracht CSB (CSB_{zu}), inerte Feststoffe ($X_{U,zu}$) und Biomasse ($X_{Bio,zu}$), Volumen Überschuss-
schlammabzug (V_{USS}) und Temperatur.

Welche Prognosegenauigkeit und welche Prognosezeiträume erforderlich sind ist kontextabhängig. Durch die Berücksichtigung von Unsicherheit in der Prognoserechnung kann fallspezifisch überprüft werden, ob die prognostizierten Daten als ausreichend genau angesehen werden. Sollte dies nicht der Fall sein, kann über eine Sensitivitätsanalyse festgestellt werden, welche Eingangsdaten und Modellparameter einen besonders starken Einfluss auf die Ergebnisse haben. Um die Prognosegenauigkeit zu erhöhen sollten nach Möglichkeit v. a. diese sensitiven Werte genauer eingegrenzt werden. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse können bspw. anhand einer grafischen Auswertung leicht interpretiert werden. Für das zuvor betrachtete Beispiel sind in Bild 23 die während des Prognosezeitraums auftretenden Minimum-, Median- und Maximumwerte der TS-Konzentration und des Schlammalters gegen die variierten Parameterwerte und Eingangsdaten aufgetragen. Jeder Punkt entspricht dabei einem Simulationsdurchlauf mit je einem Parameterset (insgesamt 5.000 Simulationen).

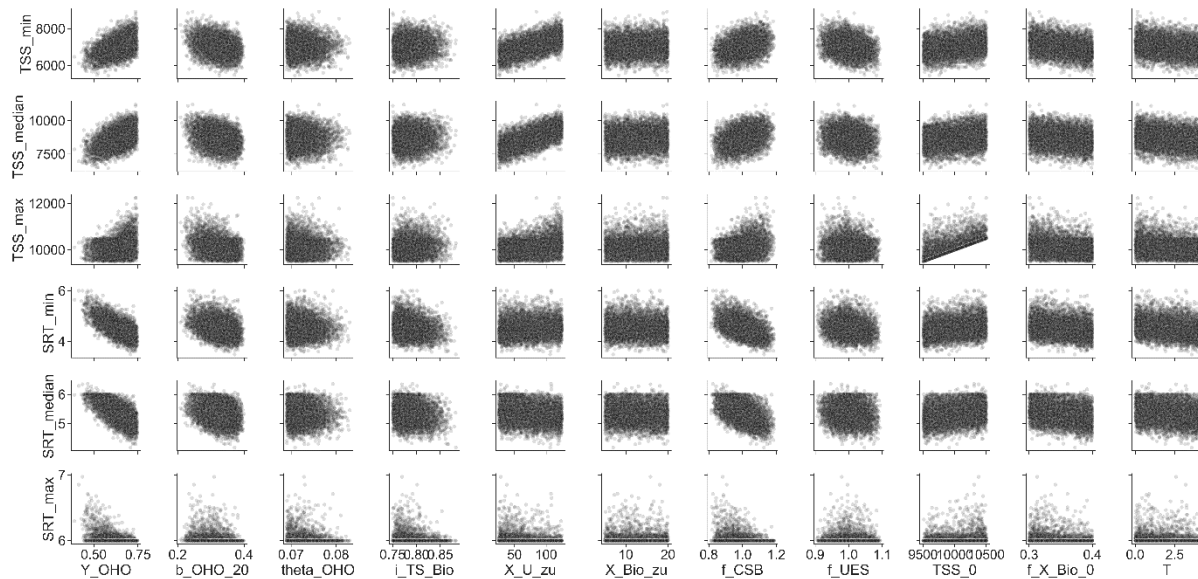


Bild 23 Einfluss der variierten Modellparameter und Eingangsdaten auf Minimum, Median und Maximum der TS-Konzentration (hier: TSS) und des Schlammalters (SRT) für die in Bild 21 gezeigte Prognoserechnung. Parameter von links nach rechts: Ertragskoeffizient (Y_{OHO} in $g_{CSB, BM}/g_{CSB}$), Sterberate ($b_{OHO, 20}$ in d^{-1}), Temperaturkoeffizient der Sterberate (θ_{OHO} , einheitenlos), TS-Gehalt der Biomasse ($I_{TS, Bio}$ in $\%/100$), Zulaufkonzentration inerter Feststoffe ($X_{U, zu}$ in g/m^3), Zulaufkonzentration Biomasse ($X_{Bio, zu}$ in g/m^3), multiplikativer Faktor der Abweichung der Zulauf-CSB-Konzentration vom erwarteten Wert (f_{CSB} in $\%/100$), multiplikativer Faktor der Abweichung des Überschussschlammvolumens vom erwarteten Wert (f_{UES} in $\%/100$), anfängliche TS-Konzentration (TSS_0), anfänglicher Anteil der Biomasse am Gesamt-TS ($f_{X_{Bio, 0}}$ in g/g) und Temperatur (T in $^{\circ}C$).

Aus Bild 23 ist bspw. zu erkennen, dass der Ertragskoeffizient (Y_{OHO}) und die Konzentration der inerten Feststoffe im Zulauf ($X_{U, zu}$) den größten Einfluss auf Minimum und Median der TS-Konzentration haben. Das minimale und mittlere Schlammalter werden am stärksten vom Ertragskoeffizienten und der CSB-Zulaufkraft (f_{CSB} , hier als multiplikativer Faktor der Abweichung vom erwarteten Wert) beeinflusst. Im Gegensatz dazu hat bspw. die Biomasse im Zulauf ($X_{Bio, zu}$) über den hier variierten Bereich keinen erkennbaren Einfluss auf die betrachteten Ausgangsgrößen. Anhand der aus der Sensitivitätsanalyse gewonnenen Informationen kann eingeschätzt werden, ob eine Erhöhung der Prognosegenauigkeit praktikabel ist, und ggf. die gezielte Aufnahme zusätzlicher Daten geplant werden. Zudem ist aus den Simulationsergebnissen zu erkennen, unter welchen Bedingungen und mit welcher Wahrscheinlichkeit ein als problematisch angesehener Zustand (bspw. $TS > 11$ g/L) eintreten kann. So kann ggf. gezielt darauf hingearbeitet werden, diese Rahmenbedingungen zu vermeiden (hier bspw. zu geringer Überschussschlammabzug).

3.6 Weitere Anwendungsmöglichkeiten für die Simulationsmodelle

Neben der direkten Unterstützung des laufenden Betriebes können die für das OSCAR-PLS entwickelten Modelle auch „offline“ verwendet werden, bspw. zur:

- Schulung des Betriebspersonals (Abschnitt 3.6.1),
- Entwicklung und Optimierung von Betriebs- und Regelungsstrategien (Abschnitt 3.6.2),
- Planung von Anlagenum- und -neubauten (Abschnitt 3.6.3),
- Weiterentwicklung der Abwasser- und organischen Reststoffbehandlung (Abschnitt 3.6.4).

Hinweise und Anmerkungen zur Nutzung der Modelle in den genannten Anwendungskontexten sind in den folgenden Abschnitten kurz dargelegt.

Kernaussagen

- Modelle stellen eine systematische und in verschiedenen Kontexten direkt nutzbare Dokumentation des Anlagenzustands sowie des vorhandenen Prozesswissens dar.
- Die zur Zulauf- und Betriebsprognose verwendeten Modelle können zu vielfältigen weiteren Zwecken der Betriebs- und Anlagenoptimierung direkt genutzt werden oder als Ausgangspunkt dienen.
- Der Aufwand der Modellerstellung und -pflege zahlt sich weit über die Nutzung der Modelle zur Betriebsunterstützung aus.

3.6.1 Schulung des Betriebspersonals

Die für die Betriebsprognose genutzten Modelle können als Grundlage für die Schulung des Betriebspersonals eingesetzt werden. Die Nutzung von Simulationen zur Personalschulung bietet diverse Vorteile:

- In den Simulationen können veränderte Randbedingungen und extreme Betriebssituationen abgebildet werden. So kann das Betriebspersonal auf verschiedenste Situationen vorbereitet werden, ohne dass diese an der realen Anlage auftreten müssen.
- Insbesondere detaillierte Anlagenmodelle (bspw. ASM-basiert) ermöglichen durch die Vielzahl bereitgestellter Informationen zu den Bedingungen und Reaktionsraten in den einzelnen Bereichen der Anlage gute Voraussetzungen zur Vertiefung des Prozessverständnisses.

Bei der Verwendung der Modelle für Schulungszwecke ist keine genaue Kalibrierung erforderlich. Wichtig ist, dass die wesentlichen Zusammenhänge zwischen Betriebseinstellungen und Prozess durch das Modell realistisch abgebildet werden. Der zusätzliche Aufwand für die Durchführung modellbasierter Schulungen besteht daher im Wesentlichen in der Konzipierung der Schulung, bspw. die Auswahl und Erstellung der Betriebsszenarien und ggf. die Verknüpfung der im Betrieb vorhandenen Benutzeroberfläche (oder einer entsprechenden Nachahmung) mit dem Modell.

3.6.2 Entwicklung und Optimierung von Betriebs- und Regelungsstrategien

Eine weitere Nutzungsmöglichkeit für die Prognosemodelle besteht in der modellgestützten Entwicklung von Betriebs- und Regelungsstrategien. Daraus ergeben sich u. a. folgende Vorteile:

- Zur (ersten) Entwicklung und Erprobung ist kein Eingriff in den realen Anlagenbetrieb notwendig (kein Risiko, geringere Kosten).
- Es können Berechnungen für verschiedene Szenarien durchgeführt werden, die auch Extremsituationen umfassen können, welche bei Tests an der realen Anlage nicht auftreten (sollten).
- Die Modelle stellen zusätzliche Daten für die Bewertung der getesteten Strategien bereit, die an der realen Anlage nicht oder nur mit Zusatzaufwand erhoben werden könnten.
- Die Simulation liefert eine standardisierte, faire Vergleichsbasis für alle getesteten Strategien, die im realen Betrieb nicht einfach zu erzielen ist.
- Veränderte Randbedingungen, wie bspw. geplante Umbauten, können in der Simulation berücksichtigt werden.
- Auch für noch nicht existierende Anlagen können Betriebs- und Regelungsstrategien entwickelt und so bereits im Entwurfsprozess berücksichtigt werden (siehe auch Abschnitt 3.6.3).

Je genauer die Dynamik der relevanten Prozesse und involvierten Messungen und Aktoren vom Modell erfasst wird, desto detaillierter kann die Entwicklung und Planung erfolgen (bspw. Tuning von Reglern). Für die grundsätzliche Konzipierung von Betriebs- und Regelungsstrategien ist es jedoch ausreichend, wenn die Modelle die wesentliche Dynamik der für die Steuerung bzw. Regelung relevanten Prozesse abbilden. Diese Anforderung wird durch die in der Betriebsunterstützung genutzten Prognosemodelle erfüllt. Eine sinnvolle Ergänzung der Modelle wäre die Berechnung zusätzlicher bewertungsrelevanter Größen, wie bspw. des Energiebedarfs oder auch direkter und indirekter Treibhausgasemissionen. Diese ließen sich leicht in die verwendeten Modelle integrieren (sofern die entsprechenden Hintergrunddaten, bspw. Energiebedarf der Gebläse und Pumpen, bekannt sind).

Anknüpfend an die Arbeiten in OSCAR könnten konkrete Anwendungsfälle bspw. die Entwicklung von Regelungsstrategien für die Speichertankentleerung (mit Zulaufprognosemodell und hydraulischem Modell der Speichertanks) oder der Vergleich von gemeinsamer oder getrennter Behandlung von Grau- und Schwarzwasser inkl. Entwicklung angepasster Betriebsweisen (unter Nutzung des Zulaufprognose-, Speichertank- und Nährstoffeliminationsmodells) sein.

3.6.3 Planung von Anlagenum- und -neubauten

Die Nutzung von Modellen erleichtert die Berücksichtigung fallspezifischer Randbedingungen in der Planung und Auslegung und damit die Entwicklung optimal zugeschnittener Lösungen. Konkret kann der Entwurfsprozess durch für die Betriebsunterstützung erstellte Modelle u. a. auf folgende Weise unterstützt und verbessert werden:

- Die Modelle bestehender Anlagen bieten eine gute Planungsgrundlage für Anlagenumbauten, indem in Erwägung gezogene Veränderungen in das bestehende Modell integriert und die Auswirkungen auf den Betrieb simuliert werden können.
- Insbesondere für Neubauten, für die noch keinen realen Zulaufdaten verfügbar sind, kann über die Zulaufprognose eine bessere Datenbasis geschaffen werden.

Das in OSCAR entwickelte Zulaufprognosemodell kann bspw. gut bei der Planung von Neuanlagen herangezogen werden. Durch den modularen, teilstrombasierten Aufbau und die Parametrierbarkeit des Modells können fallspezifische Gegebenheiten bei der Abschätzung des zu erwartenden Kläranlagenzulaufs einfach berücksichtigt werden.

Allgemeine Vorteile der Nutzung von Modellen in der Planung sind u. a.:

- Die Nutzung von Modellen erleichtert die Berücksichtigung fallspezifischer Randbedingungen in der Planung und Auslegung und damit die Entwicklung optimal zugeschnittener Lösungen.
- Durch die Modellierung wird eine einheitliche und fallspezifische Bewertungsgrundlage geschaffen, um zwischen verschiedenen Designoptionen zu entscheiden.
- Betriebs- und Automatisierungsstrategien können über Simulationsmodelle einfacher in den Entwurfsprozess eingebunden und so direkt bei der Dimensionierung und Ausgestaltung der Anlage berücksichtigt werden (benötigte/sinnvolle betriebliche Flexibilität, erwartete Maximallasten usw.).
- Die Modelle dokumentieren den Planungsstand auf eine systematische und direkt nutzbare Weise.
- Der im Planungsprozess erstellte digitale Anlagenzwilling kann im anschließenden Betrieb weiter verwendet werden. Dadurch kann zudem leichter nachvollzogen werden, ob die Anlage die erwartete Funktionalität und Effizienz erreicht und falls nicht, wo ggf. noch Optimierungspotenzial im Betrieb besteht.

3.6.4 Weiterentwicklung der Abwasser- und organischen Reststoffbehandlung

Für die Entwicklung und Planung alternativer Behandlungskonzepte und Verfahren zur Abwasser- und organischen Reststoffbehandlung ist insbesondere die Kenntnis der zu behandelnden Stoffströme (Zusammensetzung, Menge, Anfalldynamik) relevant. Hier kann das Zulaufprognosemodell wertvolle Planungsdaten liefern. Durch den teilstrombasierten Aufbau kann bspw. für die separate (Vor)behandlung einzelner Teilströme der Zulauf zu den jeweiligen Verfahrensstufen berechnet werden.

Im Gegensatz zur Betriebsunterstützung sind für die Entwicklung von Behandlungs- und Nutzungskonzepten sowie die erste Einengung in Frage kommender Verfahren Verfahren-/Anlagenmodelle von deutlich geringerem Detailgrad nötig und sinnvoll⁸. Wesentlich sind dabei die belastbare Berechnung relevanter Bewertungsgrößen (bspw. Investitionen, Betriebskosten, Energiebedarf, Platzbedarf usw.) und eine ausreichende Sensitivität der Modelle, um Unterschiede zwischen den Varianten realistisch abzubilden. Weiterführende Informationen zur modellbasierten Planungsmethodik können bspw. den Abschlussberichten der BMBF-Projekte E-Klär (Fokus: Energieoptimierung kommunaler Kläranlagen), EXPOPLAN (Fokus: Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung in warmen und kalten Klimaten) und WaRelp (Fokus: Wasserwiederverwendung in Industrieparks) entnommen werden.

3.7 Umsetzungshinweise

Der folgende Abschnitt enthält Umsetzungshinweise, insbesondere zur Einbettung digitaler Zwillinge in das übergeordnete PLS. Die grundsätzliche Funktionalität des übergeordneten PLS mit Fernzugriff ist in Abschnitt 3.1 beschrieben. Weitere Details zum vom Projektpartner SEGNO entwickelten IoT-Connector sowie zu den entwickelten Cloud-Applikationen können dem Abschlussbericht von SEGNO entnommen werden.

Kernaussagen

- Zum Aufbau eines übergeordneten digitalen PLS mit der Möglichkeit der Anbindung von Simulationsmodellen ist vielfältige Software (auch Open Source) verfügbar, die die Implementierung erleichtert.
- Die einzubindenden Untersysteme (PLS, Messumformer usw.) müssen geeignete Schnittstellen aufweisen, über die die Kommunikation mit dem übergeordneten PLS stattfinden kann (Lesen und ggf. Schreiben relevanter Daten über gängige Industriekommunikationsprotokolle). Da eine Nachrüstung nicht immer möglich ist oder kostspielig sein kann, sollte bei Neuanschaffungen darauf geachtet werden, dass entsprechende Schnittstellen vorhanden sind.
- Sobald die grundsätzlich benötigte Hardware und digitale Infrastruktur zur Zusammenführung, Speicherung und Weiterverarbeitung sowie dem (Fern)zugriff auf die Daten vorhanden sind, ist für die Anpassung, Weiterentwicklung und Erweiterung des digitalen Systems lediglich der Aufwand für die Softwareentwicklung zu erbringen. Dadurch sind eine hohe Flexibilität und großes Entwicklungspotenzial gegeben.
- Der Aufwand für die Implementierung eines für ein Schiff/eine Anlage entwickelten Systems auf zusätzlichen Schiffen/für zusätzliche Anlagen ist vergleichsweise gering, da die bereits vorhandenen Softwarekomponenten genutzt werden können. Für Flotten mit vergleichbaren Anlagen ergibt sich dadurch ein signifikanter Skaleneffekt.

⁸ In der frühen Planung können die Parameter komplexerer Modelle i. d. R. nicht ausreichend eingengt werden, um einen Vorteil gegenüber der Nutzung einfacherer Modelle zu erzielen.

Eine wichtige Voraussetzung für die Umsetzung digitaler Zwillinge ist die Zusammenführung aller relevanten Daten aus der realen Anlage (dem physischen Zwillings) in einer digitalen Umgebung. Dabei bestehen folgende Anforderungen:

- Die Daten aus dem PLS der Anlage, von Messumformern usw. müssen, möglichst automatisiert und in Echtzeit, in die Simulationsmodelle eingespeist werden können.
- Die von den digitalen Zwillingen berechneten Werte sollten möglichst nahtlos in einer Umgebung zusammen mit den Daten (Messwerten, sonstigen Signalen) aus dem physischen Zwillings dargestellt werden können und abrufbar sein.
- Um die Fernwartung der digitalen Zwillinge aus einer zentralen Leitwarte von Land heraus zu ermöglichen, sollte zudem ein (Fern)zugriff auf die Simulationsmodelle möglich sein.

Zur Einbindung der Simulationsmodelle in die in OSCAR genutzte IoT-Infrastruktur bestehen im Wesentlichen zwei Möglichkeiten, die in Bild 24 schematisch dargestellt sind.

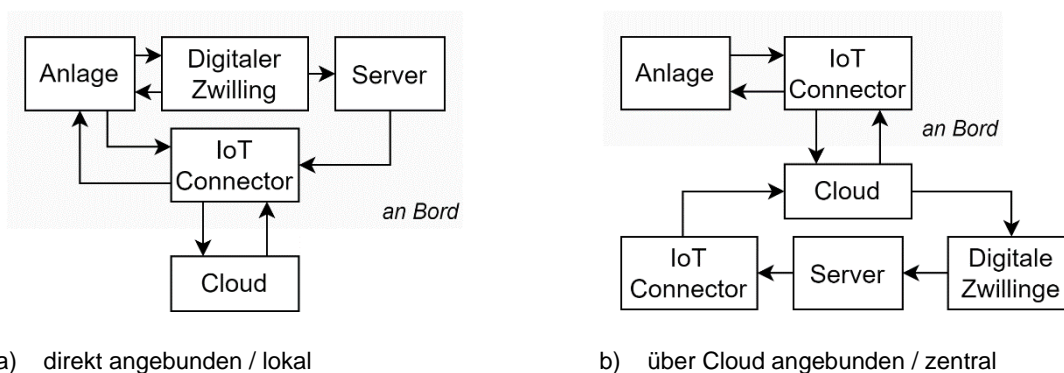


Bild 24 Schematische Darstellung der Möglichkeiten zur Einbettung der digitalen Zwillinge in die IoT-Infrastruktur

Die Modelle können zum einen auf lokal installierter Hardware direkt an Bord laufen (PC oder Server) (Bild 24a)). In diesem Fall können die Eingangsdaten direkt aus der Anlage über gängige Industriekommunikationsprotokolle (bspw. Modbus TCP oder OPC UA) gelesen werden. Für die zur Modell-Implementierung in OSCAR verwendeten Softwarelösungen existieren dazu spezielle Bibliotheken für Python bzw. der ifakFAST-Mediator für SIMBA#⁹. Um die simulierten Daten in die Cloud zu übertragen, können diese bspw. über einen passenden Server (bspw. Modbus oder OPC UA) für den Abruf durch den IoT-Connector bereitgestellt werden (auf diese Weise muss keine zusätzliche direkte Schnittstelle zwischen digitalem Zwillings und Cloud eingerichtet werden). Alternativ (oder ergänzend) können die digitalen Zwillinge die Eingangsdaten aus der Cloud beziehen (Bild 24b)). Je nach Cloudlösung kann die Kommunikation zwischen digitalem Zwillings und Cloud über eine API oder einen (ggf. manuell angestoßenen) Datelexport/-import realisiert werden. Bei dieser Variante ist der digitale Zwillings „standortunabhängig“ und kann entsprechend auch auf an Land verorteter Hardware ausgeführt werden. Bei Kommunikationsunterbrechungen zwischen Schiff und Cloud stehen die Simulationsergebnisse dann allerdings an Bord nicht zur Verfügung. In dieser Hinsicht ist die Ausführung der Modelle auf Hardware vor Ort für die Nutzung der digitalen Zwillinge im laufenden Betrieb (Monitoring, Prognose, insbesondere bei Regelung) von Vorteil. Für Berechnungen bspw. zur Prozessanalyse, -optimierung etc., die nicht in Echtzeit mitlaufen müssen, ist der Abruf der Eingangsdaten aus der Cloud eine praktische Lösung.

⁹ Alternativ können auch SIMBA#-Modelle über die SIMBA-http-API in eigenen Code eingebettet werden.

Um die oben beschriebenen Lösungen umsetzen zu können, müssen anlagenseitig geeignete Schnittstellen vorhanden sein, um die benötigten Daten aus den Untersystemen der Anlage (PLS, Messumformer usw.) auslesen und ggf. Sollwerte zurückschreiben zu können. Dazu sollten möglichst gängige Industriekommunikationsprotokolle genutzt werden können, u. a. um keinen zusätzlichen Aufwand für die Programmierung und Pflege spezieller Schnittstellen oder die Einbettung zusätzlicher herstellerspezifischer Software betreiben zu müssen. Die Bereitstellung entsprechender Schnittstellen ist (vor allem bei älteren Anlagen) nicht immer gegeben, aber kann u. U. nachgerüstet werden. Da dies nicht immer möglich und ggf. kostspielig ist, sollte bei Neuanschaffungen und Neubauten darauf geachtet werden, dass entsprechende Schnittstellen von vornherein vorhanden sind.

Sobald die benötigte Hardware vorhanden und konfiguriert und die digitale Umgebung grundsätzlich eingerichtet ist, können die Software-Komponenten des übergeordneten PLS, ggf. auch per Fernzugriff, flexibel angepasst, weiterentwickelt, erweitert und ausgetauscht werden. Da eine Vielzahl von Softwarelösungen, Modellierungsansätzen usw. auf derselben Hardware und mit derselben Systemkonfiguration realisiert werden können, besteht ein enormes Entwicklungspotenzial. Zudem bringt allein die Zusammenführung, systematische Ablage und einfache Bereitstellung der Daten schon einen deutlichen Mehrwert. Vorteilhaft ist auch, dass die für ein Schiff/eine Anlage entwickelten Softwarekomponenten mit verhältnismäßig geringem Aufwand auf weitere Schiffe/Anlagen übertragen werden können. Für Flotten mit vergleichbaren Anlagen ergibt sich dadurch ein signifikanter Skaleneffekt. Insgesamt besteht also ein hohes Potenzial bei geringem Risiko für Fehlinvestitionen, solange Personal (in-house oder Dienstleister) zur Betreuung und Entwicklung der Softwarekomponenten zur Verfügung steht. Ein wesentlicher Teil der software- und modellbezogenen Arbeiten kann, insbesondere wenn ein (Fern)zugriff aus der Zentrale auf die relevanten Daten und Systeme möglich ist, von entsprechend qualifiziertem Personal an Land durchgeführt werden. Dies ist besonders vorteilhaft, wenn mehrere Schiffe mit vergleichbaren Systemen von Land aus betreut werden. Zudem ergeben sich dadurch keine zusätzlichen Anforderungen an das Betriebspersonal an Bord.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem OSCAR-Konzept wird ein für die Schifffahrt innovativer Ansatz der Betriebsunterstützung und -optimierung für Umwelttechnologien an Bord von Kreuzfahrtschiffen vorgestellt. Mit einer cloudbasierten Datenerfassung und -analyse und der Implementierung digitaler Zwillinge werden dabei die Möglichkeiten der Digitalisierung einbezogen und genutzt. Die in OSCAR entwickelten Lösungen ermöglichen eine Optimierung des Betriebs und die Minimierung von Betriebsstörungen, auch ohne dass speziell geschultes Personal an Bord sein muss.

Im Rahmen des Projektes OSCAR wurde das Konzept für die biologische Abwasserreinigung und organische Reststoffbehandlung an Bord konkretisiert, mit dem Ziel die Anlagenzuverlässigkeit zu verbessern und die Umwelteffizienz zu steigern. Das ausgearbeitete Konzept umfasst:

- **Speicher- und Zulaufmanagement** zur Bereitstellung eines möglichst gleichmäßigen bzw. auf den Zustand der Schiffskläranlage abgestimmten Zulaufs sowie möglichst umweltfreundlicher Entsorgung organischer Reststoffe
- **erweitertes (Online-)Messkonzept für die biologische Stufe** der Schiffskläranlage sowie **systematische Ablage und vereinfachte Bereitstellung der Betriebsdaten** zur Verbesserung der Datengrundlage für die Betriebsüberwachung und gezielte Betriebsführung
- **betriebsbegleitende Simulation der biologischen Stufe der Schiffskläranlage (digitale Zwillinge)** zur Unterstützung von Prozessmonitoring und -analyse sowie zur Bereitstellung von Betriebsprognosen für eine vorausschauende Betriebsweise
- **cloudbasierte Datenspeicherung, -bereitstellung und -analyse** zur Ermöglichung eines (landseitigen) zentralen Flottenmanagements durch spezialisiertes Personal

Wesentliche Ergebnisse der durch das ISAH durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur praktischen Umsetzung und Erprobung des OSCAR-Konzeptes sind nachfolgend zusammengefasst.

Anhand vom Projektpartner CMG bereitgestellter Daten sowie Ergebnissen vorangegangener Forschungsprojekte und Literaturwerten wurde eine umfassende **Charakterisierung des Anfalls und der Zusammensetzung der Abwasserteilströme** an Bord (typische personenspezifische Werte sowie Tagesdynamik) vorgenommen. Dabei verdeutlichte sich, dass sowohl die Abwassermenge als auch die Schmutz- und Nährstofffrachten einen ausgeprägten Tagesgang aufweisen. Eine möglichst weitgehende **Vergleichmäßigung der Zulauffrachten und -mengen** würde sich positiv auf den Kläranlagenbetrieb auswirken, da bspw. die Betriebseinstellungen seltener angepasst werden müssen, um günstige Betriebsbedingungen aufrecht zu halten. Zudem erlaubt die Vergleichmäßigung des Kläranlagenzulaufs bzw. die Abpufferung von Lastspitzen perspektivisch Optimierungen/Einsparungen bei der Auslegung der Schiffskläranlage, da Anlagenteile, die auf Spitzenlasten ausgelegt werden (bspw. Belüfterkapazität, Membranfläche), kleiner gehalten werden könnten. Für das in OSCAR betrachtete Beispielschiff deuten die Ergebnisse darauf hin, dass der mögliche Nutzen der Speichertanks für die Zulaufvergleichmäßigung mit der aktuellen Regelung nicht voll ausgeschöpft wird. Ein erweitertes Zulaufmanagement wäre mit den bereits vorhandenen Systemen weitgehend umsetzbar und würde im Wesentlichen Anpassungen der Speichertankregelungssoftware und der organisatorischen Abläufe erfordern. Dazu ist die Entwicklung entsprechender Regelungsalgorithmen für die Speichertankbewirtschaftung erforderlich. Die in OSCAR ermittelten Daten zur Zusammensetzung und Anfalldynamik der Abwasserteilströme bilden eine erste Grundlage dafür.

Für den **Betrieb der biologischen Stufe** der Schiffskläranlage wurden, unter Berücksichtigung der Randbedingungen an Bord, **Betriebsstrategien** aus bekannten theoretischen Zusammenhängen und

Erfahrungen abgeleitet. Die bisher an Bord des in OSCAR betrachteten Beispielschiffes verfügbaren Messdaten und Prozessinformationen sind für die zielgerichtete Betriebsführung nicht ausreichend. Gemeinsam mit dem Projektpartner CMG wurde daher ein erweitertes **Messkonzept** erarbeitet, das die Umsetzung der o. g. Betriebsstrategien ermöglicht und weitere für die Betriebsüberwachung sinnvolle Messgrößen umfasst (siehe dazu auch Abschlussbericht von CMG).

Die **Zusammenführung, Aufbereitung und leicht zugängliche Bereitstellung relevanter Daten in einer digitalen Umgebung mit Cloudzugriff** (hier: Siemens Mindsphere) wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner SEGNO erfolgreich umgesetzt. Ergänzend wurde seitens des ISAH die Zeitreihendatenbank influxdb mit Grafana als Frontend zur Darstellung der Daten getestet. Die Implementierung erfolgte an den zur Entwicklung und Erprobung der digitalen Zwillinge vom ISAH betriebenen Versuchsanlagen. Die übersichtliche grafische Darstellung sowie der einfache Zugriff auf aktuelle sowie historische Daten erleichtern es, einen schnellen Überblick über den Anlagenzustand zu erhalten, Trends zu erkennen und Vergleiche zum vorangegangenen Betrieb zu ziehen. Die einheitliche Ablage und zentrale Bereitstellung der Daten ermöglicht dem zentralen Flottenmanagement, den Betrieb verschiedener Anlagen zu vergleichen. Dadurch können Erfahrungswerte zu typischen Wertebereichen und Prozessverhalten gewonnen werden, Optimierungspotenziale erkannt und „best practices“ weitergegeben werden. Die gesammelten Daten liefern perspektivisch nicht nur eine belastbare Grundlage für die Betriebsoptimierung (mittel- bis langfristig auch mittels datengetriebener Methoden), sondern auch für die Planung von Anlagenum- und -neubauten.

Zur Implementierung der **digitalen Zwillinge** für Prozessmonitoring und -analyse sowie Prognoserechnungen wurden geeignete **Modellierungsansätze** ausgewählt und für die Modellierung der Abwasserreinigung und organischen Reststoffbehandlung an Bord angepasst. Für die Modellierung der biologischen Stufe der Schiffskläranlage wurden ein zeitlich eher grob aufgelöstes Modell für die Schlammmenge und -zusammensetzung sowie ein zeitlich höher aufgelöstes Modell mit Fokus auf die Nährstoffelimination implementiert und erprobt. Die beispielhafte Umsetzung und Erprobung der betriebsbegleitenden Simulation fand an einer mit zusätzlicher Messtechnik ausgestatteten Schiffskläranlage statt, welche über 14 Monate im Technikum des ISAH betrieben wurde. Ergänzend wurden Versuche an einer Laborkläranlage durchgeführt.

Für das **Prozessmonitoring** bietet der Abgleich von Messwerten mit den berechneten Erwartungswerten eine zusätzliche Möglichkeit, die Verlässlichkeit der Messwerte (insbesondere von Online-Sensoren) einzuschätzen. Zudem können dadurch Abweichungen vom erwarteten Prozessverhalten erkannt und mögliche Ursachen anhand der Modelle analysiert werden. Die Beobachtermodelle stellen darüber hinaus zusätzliche Daten bereit, die messtechnisch nicht erfasst werden (können). Konkrete Nutzungsmöglichkeiten der **Prognose** für das Zulaufmanagement und den Schiffskläranlagenbetrieb sind bspw.:

- die vorausschauende Planung des Schlammabzugs unter Berücksichtigung des Kläranlagenzustands und der Möglichkeiten zur Schlammspeicherung und -abgabe,
- die vorausschauende Planung der Zeiten der organischen Reststoffbehandlung, zur gezielten Vermeidung von Frachtspitzen in Zeiten ohnehin hoher Frachten, oder auch zur gezielten Zugabe von CSB aus Speiserestpresswasser zur Unterstützung der Denitrifikation, sowie gleichzeitigen Nutzung möglichst umweltfreundlicher Entsorgungswege,
- die frühzeitige Erkennung der Notwendigkeit von Anpassungen der Betriebseinstellungen.

Für eine mittel- bis langfristige Vorhersage des Kläranlagenzustandes sowie zum vorausschauenden Zulaufmanagement ist eine Prognose der Zusammensetzung und Menge des Kläranlagenzulaufs erforderlich. Dafür wurde in OSCAR ein **Zulaufprognosemodell** entworfen, das den zu erwartenden An-

fall der einzelnen Abwasserteilströme anhand verfügbarer Betriebsdaten abschätzt. Durch den modularen, teilstrombasierten Aufbau und die Parametrierbarkeit kann das Zulaufprognosemodell leicht an fallspezifische Gegebenheiten angepasst werden.

Wesentliche **Herausforderungen für die betriebsbegleitende Simulation** sind die Nachführung der Modelle (Anpassung des Modellzustands an den Anlagenzustand bei Abweichungen) sowie die Bereitstellung zuverlässiger Eingangsdaten. Für beide Aspekte wurden in OSCAR verschiedene Lösungsansätze betrachtet. Zur Etablierung praxistauglicher Methoden für den vorliegenden Anwendungsfall besteht aber noch weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Die direkte **Berücksichtigung der Unsicherheit der Simulationsergebnisse** hilft, die Relevanz von Abweichungen zwischen simulierten Werten und Messwerten sowie die Zuverlässigkeit des prognostizierten Betriebsverlaufs schnell und intuitiv einzuschätzen. Um neben der Unsicherheit der Eingangsdaten auch die Unsicherheit der Modellparameter zu quantifizieren, wurden in OSCAR **bayessche Methoden für die Modellkalibrierung** genutzt. Vorhandenes Wissen über zu erwartende Parameterwerte und Datenunsicherheiten können durch die Nutzung bayesscher Methoden direkt in die Modellkalibrierung einfließen. Zudem wird die verbleibende Unsicherheit bzgl. der kalibrierten Werte in Form von Häufigkeitsverteilungen quantifiziert und kann entsprechend bei der Einschätzung der Unsicherheit der Simulationsergebnisse berücksichtigt werden (bspw. über Monte-Carlo-Simulationen).

Eine wichtige **Voraussetzung** für die Anwendbarkeit von IoT-Lösungen sind offene Schnittstellen der PLS der Anlagen und Schiffe, die das Lesen und ggf. Schreiben relevanter Daten über gängige Industriekommunikationsprotokolle erlauben. Die praktische Umsetzung erfordert zudem die Beschäftigung von Personal oder Dienstleistern, die die Modelle pflegen und weiterentwickeln können.

Für das Prozessmonitoring und die Prognoserechnungen können im Wesentlichen dieselben Modelle zum Einsatz kommen, sodass eine gute Synergie zwischen beiden Aspekten der Betriebsunterstützung gegeben ist. Über die betriebsbegleitende Simulation hinaus bestehen zudem **weitere Anwendungsmöglichkeiten für die Modelle**, wie z. B. die Nutzung zur Schulung des Betriebspersonals, zur Entwicklung von Betriebs- und Regelungsstrategien, zur Planung von Anlagenum- und -neubauten oder zur Entwicklung und Planung alternativer Behandlungskonzepte und Verfahren. Ein großer Vorteil der Modellnutzung für die o. g. Zwecke ist die Möglichkeit, betriebliche Extremsituationen oder auch veränderte Randbedingungen im Modell abzubilden, ohne dass diese an der realen Anlage eintreten müssen. Zudem wird durch die Nutzung von Simulationen eine einheitliche und fallspezifische Bewertungsgrundlage für bspw. verschiedene Regelungsstrategien oder Designoptionen geschaffen.

Fazit

Insgesamt ist festzuhalten, dass das OSCAR-Konzept eine deutliche Verbesserung gegenüber dem aktuellen Prozessmonitoring darstellt und mit der Bereitstellung von Prognosen zum Prozesszustand eine bisher nicht verfügbare Unterstützung des Anlagenbetriebs an Bord bietet. Damit wird das Erzielen einer zuverlässigen und effizienten Betriebsführung vereinfacht, wodurch die Anlageneffizienz und Umweltschutzleistungen an Bord gesteigert werden können.

Über die direkte Betriebsunterstützung hinaus bietet die systematische und einheitliche Ablage von Betriebsdaten sowie die komprimierte Zusammenfassung des Anlagenzustands in Form der digitalen Zwillinge den Betreibern eine bessere Übersicht über den Zustand sowie die Leistungsfähigkeit und Effizienz der Anlagen. Die Daten und Simulationsmodelle stellen eine wertvolle Grundlage dar, sowohl für die zielgerichtete Betriebsoptimierung und die Planung von Anlagenupgrades als auch für den Entwurf und Bau funktionaler und ressourceneffizienter Anlagen sowie die Entwicklung neuer Behandlungs- und

Verwertungskonzepte für Abwasser und organische Reststoffe. Mit der in OSCAR erfolgten detaillierten Charakterisierung der Abwasserteilströme, dem daraus entwickelten Zulaufprognosemodell sowie den Modellierungsansätzen für die biologische Stufe stehen dazu bereits erste nutzbare Datensätze und fallspezifisch anpassbare Systemmodelle zur Verfügung. Die im vorliegenden Bericht und den Berichten der OSCAR-Projektpartner dargelegten Ansätze und Hinweise für die Ausgestaltung und Umsetzung des OSCAR-Konzeptes für die Abwasser- und organische Reststoffbehandlung an Bord liefern konkrete Ansatzpunkte zu dessen Einrichtung und Nutzung.

Ausblick

Der nächste Schritt hin zur praxistauglichen Umsetzung des OSCAR-Konzeptes ist die praktische Erprobung der in OSCAR entwickelten Lösungsansätze an Bord¹⁰. Dabei sollten u. a. die Gestaltung der Interaktion mit den Nutzern und die Einbindung in Betriebsabläufe im Fokus stehen. Da für die Entwicklung des Zulaufprognosemodells nur ein begrenzter Datensatz zur Verfügung stand, ist für den praktischen Einsatz eine Validierung und Weiterentwicklung anhand umfangreicherer Daten zu empfehlen.

Um die vorhandenen Speichertankvolumina (auch auf bestehenden Schiffen) im Rahmen der Zulaufbewirtschaftung besser auszunutzen, ist die Entwicklung geeigneter Speichertankregelungsstrategien erforderlich, die an die jeweiligen fallspezifischen Gegebenheiten angepasst werden können. Ein besonders interessanter Aspekt könnte dabei die Berücksichtigung des Zustandes der Kläranlage zur Erzeugung eines darauf abgestimmten Zulaufs sein. Um das Potenzial der Zulaufbewirtschaftung an Bord voll auszunutzen gilt es zudem zu untersuchen, welche Möglichkeiten der Anpassung der Speichertankgestaltung im Rahmen des Schiffsentwurfs bestehen und inwiefern abwassertechnische Aspekte dabei Berücksichtigung finden könnten.

Die digitale Abbildung der Abwasserreinigung und organischen Reststoffbehandlung legt den Grundstein, um zukünftig weitere umweltrelevante Größen bei der Betriebs- und Anlagenoptimierung zu berücksichtigen. Ein sinnvoller nächster Entwicklungsschritt wäre daher die Einbettung zusätzlicher Bewertungsgrößen wie bspw. des Energiebedarfs oder direkter und indirekter Treibhausgasemissionen in die digitalen Zwillinge (Schnittstellen zur Energieoptimierung und Dekarbonisierung). Die Anlagenfernüberwachung und Betriebsassistenz durch digitale Zwillinge kann zudem auf weitere Anlagenbereiche und Prozesse ausgedehnt werden. Durch die Vernetzung der Modelle der verschiedenen Subsysteme zu einem Gesamtsystemmodell können Interaktionen erfasst und Synergien erkannt werden. Dies stellt auch für die Weiterentwicklung der Umwelttechnologien an Bord einen großen Vorteil dar. Ein vielversprechendes Verfahrenskonzept ist bspw. die Gewinnung von Biogas aus organischen Reststoffen und organisch hoch belasteten Abwasserströmen durch anaerobe Behandlung. Durch die Modellierung der Stoffströme und Verfahrensstufen können die Auswirkungen der Anaerobstufe auf die Abwasserreinigung berücksichtigt und ein aufeinander abgestimmtes Gesamtkonzept entwickelt werden. Die für die Entwicklung und Planung erstellten Modelle können anschließend in Modelle für die betriebsbegleitende Simulation überführt werden.

Relevanz und Nutzen für weitere Anwendungsfelder

Über den in OSCAR fokussierten Kontext der Kreuzfahrtschiffe hinaus sind die entwickelten Ansätze und Konzepte auf weitere Anwendungsfelder übertragbar. Anlagen, die durch begrenzte Kapazitäten der Betriebsführung vor Ort und eine zentralisierte Betriebsbegleitung gekennzeichnet sind (bspw.

¹⁰ Die Erprobung an Bord war, unter anderem aufgrund der Auswirkungen der Corona-Pandemie, im Rahmen von OSCAR leider nicht möglich.

Kleinkläranlagen), können von den in OSCAR entwickelten Ansätzen zur betriebsbegleitenden Simulation, modellgestützten Betriebsassistenz, Automatisierung und Fernüberwachung profitieren. Einzelne Speichertanks für Teilströme unterschiedlicher Qualitäten sind auch bei Industriekläranlagen häufiger vorzufinden, sodass sich dort ein weiteres Anwendungsfeld für intelligente Zulaufregelungskonzepte ergibt. Die in OSCAR gewonnenen Erkenntnisse zu den Abwasserteilströmen an Bord sind ebenfalls im Rahmen der getrennten Abwasserbehandlung im kommunalen Bereich ("source separation", neuartige Sanitärsysteme) von Bedeutung.

Anhang A Charakterisierung der Abwasserteilströme

A.1 Datengrundlage

Im Folgenden sind die für die Teilstromcharakterisierung genutzten Datenquellen beschrieben. Einzelne Verweise auf weitere Literaturquellen finden sich bei den entsprechenden Angaben im Text des Abschnittes A.2.

A.1.1 Daten aus Messkampagnen an Bord

Aus den zuvor implementierten Forschungs- und Entwicklungs-Projekten CLEAN (BMW FKZ 03SX437C) und NAUTEK (BMW FKZ 03SX360A) standen Daten von 6 verschiedenen Schiffen zur Verfügung, die an Wechseltagen im Hafen sowie im Rahmen einer 6-tägigen Messkampagne während einer Kreuzfahrt gemessen wurden. Weiterführende Informationen können den Abschlussberichten der Forschungsvorhaben entnommen werden. Hinzu kommen Daten aus einer im Oktober 2022 im Rahmen von OSCAR durchgeführten Beprobung auf einem weiteren Schiff. Ergänzend wurden Daten von 4 weiteren Schiffen herangezogen, die von der United States Environmental Protection Agency (US EPA) erhoben wurden (US EPA, 2006a, 2006b, 2006c, 2006d), sowie Daten der MS Zaandam aus Ohle, Keutgen und Noble (2009). Wesentliche Informationen zu den Schiffen, auf denen die Beprobungen stattfanden, sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

A.1.2 Aufgezeichnete Tankfüllstände

Seitens des Projektpartners CMG wurden Screenshots der aufgezeichneten Füllstände der Grauwassersammeltanks über einen Zeitraum von 8 Tagen zur Verfügung gestellt¹¹. Bild 25 zeigt beispielhaft einen der genutzten Screenshots. Die Füllstandsdaten wurden aus den Screenshots in numerischer Form extrahiert, um daraus den Abwasseranfall in möglichst hoher zeitlicher Auflösung zu berechnen (Tagesgang). Zeiten zu denen der Tank geleert wurde (Auslassventil offen, sinkender Füllstand) wurden dabei exkludiert.

A.1.3 Wäschereiprotokolle

Seitens CMG wurden 3 Wäschereiprotokolle bereitgestellt, in denen an jeweils einem Wechseltag sowie dem Tag davor und danach Nutzungszeiten, Waschprogramme und Menge der gewaschenen Wäsche für alle Waschmaschinen der Hauptwäscherei aufgeführt sind. Der Tagesgang des Wäschereiabwassers wurde anhand der in den Wäschereiprotokollen enthaltenen Informationen, dem in den technischen Datenblättern spezifiziertem Wasserverbrauch der jeweiligen Maschinen und unter der Annahme einer über den Waschvorgang konstanten Abwasserabgabe berechnet.¹²

¹¹ Die Füllstände der Schwarzwassersammeltanks (Vakuumentanks) werden nicht gemessen.

¹² Tatsächlich ist davon auszugehen, dass der Wäschereiabwasseranfall stärkere kurzfristige Fluktuationen aufweist, die durch die Abpumpzyklen der Waschmaschinen sowie die verhältnismäßig geringen Abwassermengen von Trocknern und Mangeln hervorgerufen werden. Im Rahmen der hier getätigten Betrachtungen sind diese Fluktuationen jedoch vernachlässigbar.

Tabelle 4 Informationen zu beprobten Schiffen und Messkampagnen (eigene Daten und genutzte Literaturdaten)

Schiff	Passagierzahl (Pax)	Besatzung (Crew)	Pax:Crew	Reiseregion und -dauer	Datenquelle (Messwerte)
Typ 1a (2 Schiffe)	ca. 2100*	ca. 645*	3,25*	Beprobung: Ostsee (Wechseltage) Abwasseranfall: Karibik (9 Tage einer 15-tägigen Kreuzfahrt)	Beprobung: NAUTEK; Abwasseranfall: OSCAR
Typ 1b (3 Schiffe)	ca. 2260*	ca. 695*	3,25*	Beprobung: Ostsee (Wechseltage), Kanarische Inseln (6-tägige Kreuzfahrt auf Schiff C) Abwasseranfall: Ostsee	Beprobung: NAUTEK, OSCAR; Abwasseranfall: OSCAR
Typ 2 (2 Schiffe)	ca. 3740*	ca. 1150*	3,25*	Ostsee (Wechseltage)	CLEAN
<i>Oosterdam</i>	1857	768	2,42	Alaska (8-tägige Kreuzfahrt)	US EPA (2006a)
<i>Veendam</i>	ca. 1300	ca. 520	2,50	Alaska (8-tägige Kreuzfahrt)	US EPA (2006b)
<i>Norwegian Star</i>	2591	1144	2,26	Alaska (8-tägige Kreuzfahrt)	US EPA (2006c)
<i>Island Princess</i>	2019	906	2,23	Alaska (8-tägige Kreuzfahrt)	US EPA (2006d)
<i>MS Zaandam</i>	bis zu 1432	615*	2,33	unbekannt	Ohle, Keutgen und Noble (2009)

* typische Werte



Bild 25 Beispiel für einen Screenshot der aufgezeichneten Tankfüllstände (schwarz: Füllstand; rot: Ventilstellung Auslass, 1 = zu, 0 = offen)

A.1.4 Informationen zu Betriebsabläufen und technische Daten der abwassererzeugenden Geräte und Einrichtungen

Neben den detaillierten Informationen zur Wäscherei (siehe Abschnitt A.1.3) wurden mit Unterstützung von CMG weitere technische Daten und Informationen zu Betriebsabläufen zusammengetragen:

- Anzahl, Typ und technische Daten der Spülmaschinen,
- typische Haupt-Betriebszeiten der Spülmaschinen,
- ungefähre Anzahl der Mahlzeiten pro Passagieren/Crew und Tag,
- Anzahl, Typ und technische Daten der Vakuumtoiletten,
- Entwässerungs- und Trocknungsgrad der organischen Reststoffbehandlungsprozesse.

A.1.5 Permeatmengen

Von einem Schiff, auf dem eine weitgehend separate Behandlung von Grau- und Schwarzwasser in zwei Membranbioreaktor-(MBR-)Straßen erfolgt, wurden seitens CMG Daten zu den täglichen Permeatmengen über einen Zeitraum von 129 Tagen zur Verfügung gestellt.

A.1.6 Anzahl der Passagiere und Crew sowie Liegezeiten

Für die Zeiträume, in denen die Tankfüllstände, Wäschereiprotokolle und Permeatmengen vorlagen, wurden die Anzahl der Passagiere und Crew an Bord sowie die Liegezeiten in den angesteuerten Häfen seitens CMG bereitgestellt. Diese Daten wurden zur Berechnung personenspezifischer Abwassermengen genutzt.

A.2 Teilstromcharakterisierung

Die erhobenen Informationen zum personenspezifischen Abwasseranfall, dem Tagesgang des Abwasseranfalls sowie der Abwasserzusammensetzung sind im Folgenden für die einzelnen Teilströme dargestellt.

Die Konzentrationen an CSB-, TN-, Ammonium-Stickstoff-(NH₄-N-), organischem Stickstoff (org. N) und TP sowie das Verhältnis von NH₄-N:TN, die in den unter Abschnitt A.1 genannten Messkampagnen für Schwarzwasser, Küchenabwasser (vor und nach Fettabscheider), Wäschereiabwasser und Kabinengrauwasser ermittelt wurden, sind in Bild 26 dargestellt. Das Verhältnis von CSB:TN, die Konzentration an gesamtem organischen Kohlenstoff (engl. *total organic carbon*, kurz TOC), die TS-Konzentration sowie pH-Wert, Leitfähigkeit und Temperatur können Bild 27 entnommen werden. Für Abwässer aus der organischen Reststoffbehandlung (Speiserestpresswasser, Zentrat aus der Klärschlamm entwässerung und Brüdenkondensate aus der Biosludge-Trocknung) lagen nur wenige Daten vor, die in den entsprechenden Abschnitten angeführt werden. Die gemessenen Nitrat-Stickstoff-(NO₃-N-)Konzentrationen lagen größtenteils deutlich unter 1 mg/L; lediglich in zwei Schwarzwasser und zwei Wäschereiabwasserproben wurden etwas höhere Werte von max. 2,9 mg/L gemessen. Kjeldahl-Stickstoff (KN) und TN stimmen daher nahezu überein und werden im Folgenden gemeinsam betrachtet.

Ausgehend von den verfügbaren Daten sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen verschiedenen Schiffen festzustellen. Auf drei Schiffen (*Norwegian Star*, *Island Princess* und *MS Zaandam*) wurden vergleichsweise höhere TP-Konzentrationen in den Grauwasserströmen gemessen (siehe Bild 26), was vermutlich auf die Nutzung phosphorhaltiger Reinigungsmittel zurückzuführen ist (vgl. US EPA, 2006c, 2006d).

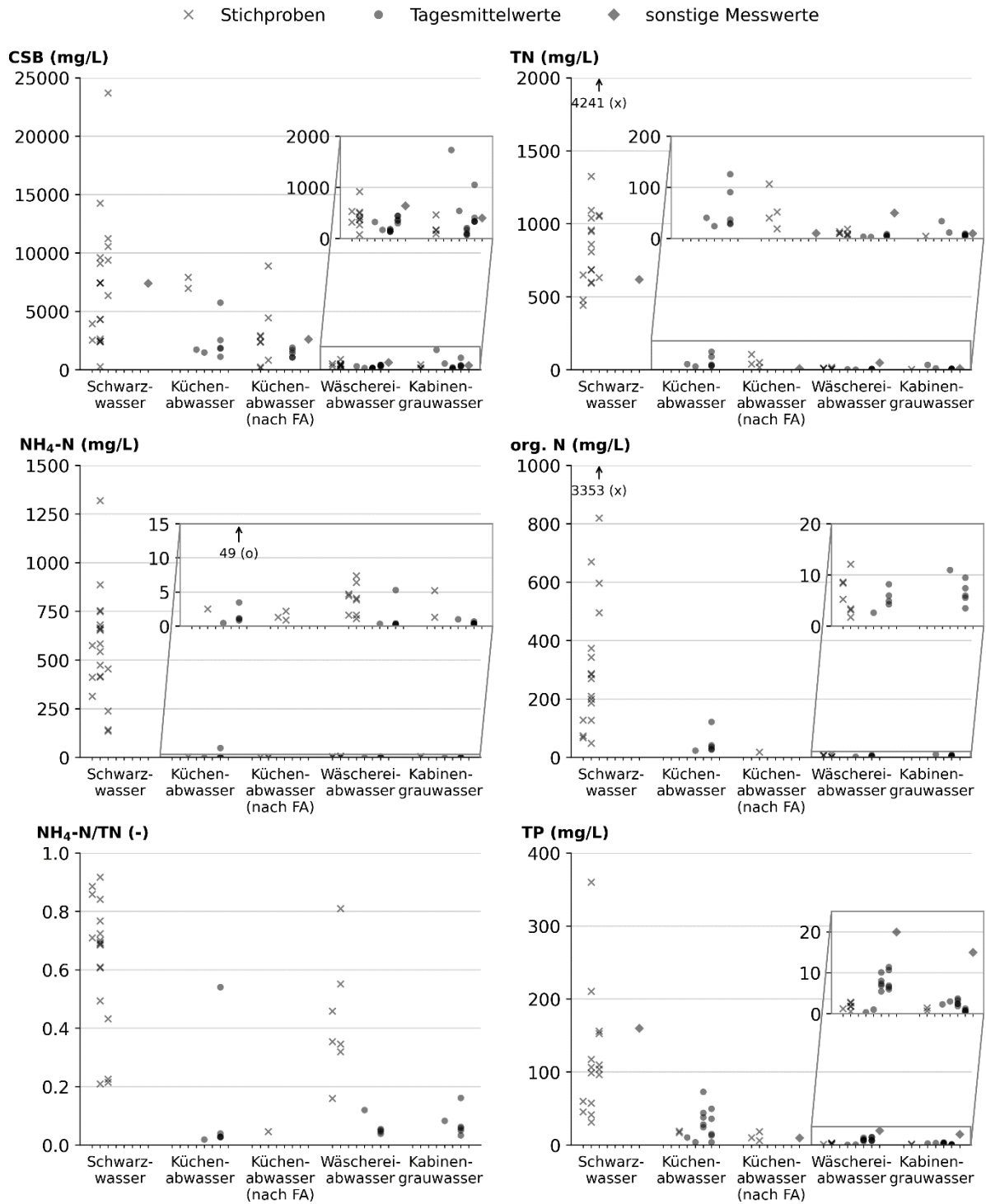


Bild 26 Gemessene Konzentrationen und Konzentrationsverhältnisse von Schwarzwasser, Küchenabwasser, Küchenabwasser nach Fettabscheider (FA), Wäschereiabwasser und Kabinengrauwasser. Daten innerhalb einer Spalte entsprechen Daten eines Schiffes – Schiffe von links nach rechts: Typ 1a, Typ 1b, Typ 2, Oosterdam, Veendam, Norwegian Star, Island Princess, MS Zaandam (Datenquellen und weitere Informationen: siehe Tabelle 4).

× Stichproben ● Tagesmittelwerte ◆ sonstige Messwerte

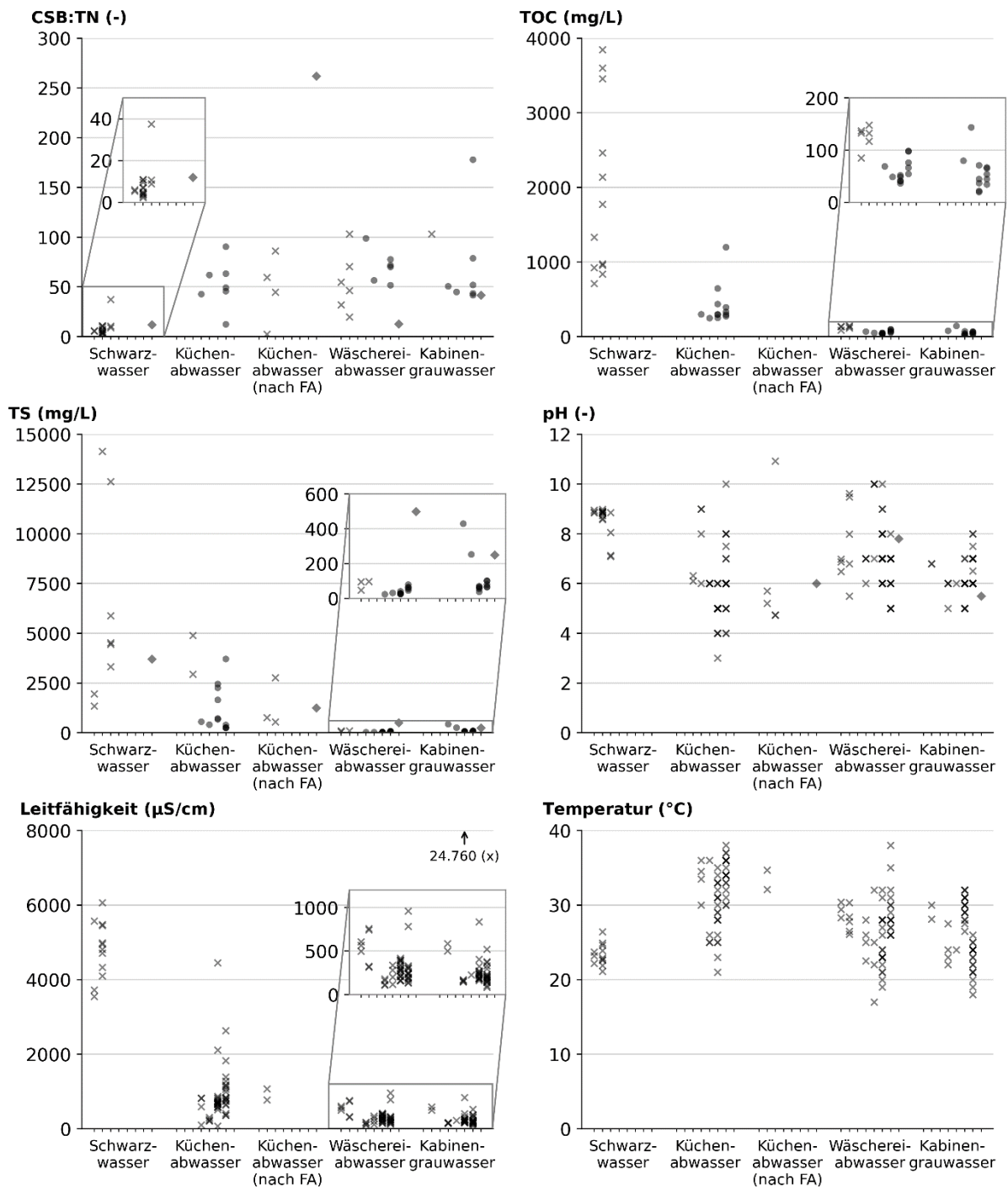


Bild 27 Weitere Messwerte von Schwarzwasser, Küchenabwasser, Küchenabwasser nach Fettabscheider (FA), Wäschereiabwasser und Kabinengrauwasser. Daten innerhalb einer Spalte entsprechen Daten eines Schiffes – Schiffe von links nach rechts: Typ 1a, Typ 1b, Typ 2, Oosterdam, Veendam, Norwegian Star, Island Princess, MS Zaandam (Datenquellen und weitere Informationen: siehe Tabelle 4).

A.2.1 Schwarzwasser

Das Toilettenschwarzwasser ist einer der am höchsten belasteten Abwasserteilströme an Bord. Die an Bord der beprobten Kreuzfahrtschiffe gemessenen CSB-Konzentrationen liegen zu über 85% im Bereich von ca. 2.400-11.250 mg/L, die Nährstoffkonzentrationen bei 440-1.325 mg TN/L und ca. 30-160 mg TP/L. Der mit 21% bis 91% stark variierende Anteil des NH₄-N am TN des Schwarzwassers (vgl. Bild 26) spricht für unterschiedliche Grade der Ammonifikation der im Schwarzwasser enthaltenen Stickstoffverbindungen (insb. Spaltung von Harnstoff CH₄N₂O in Ammoniak und CO₂, vgl. auch Bisinella de Faria et al., 2020, Hellström und Kärrman, 1996, Jönsson et al., 2005, Knerr, 2012, Udert et al., 2003). Der Fortschritt der Ammonifikation ist u. a. abhängig von der Aufenthaltszeit des Schwarzwassers in den Rohrleitungen und Tanks.

Die zusammengestellten Daten zum personenspezifischen Schwarzwasseranfall sind in Bild 28 dargestellt, gruppiert nach Herkunft der Daten. Messwerte (Bild 28a) bezeichnen tatsächlich gemessene Werte, Betreiberangaben (Bild 28b) entstammen Nachhaltigkeitsberichten der Reedereien oder Angaben der Crew und sonstige Angaben (Bild 28c) umfassen Auslegungsempfehlungen und Werte, deren Ursprung in den jeweiligen Quellen nicht genauer spezifiziert wurde.

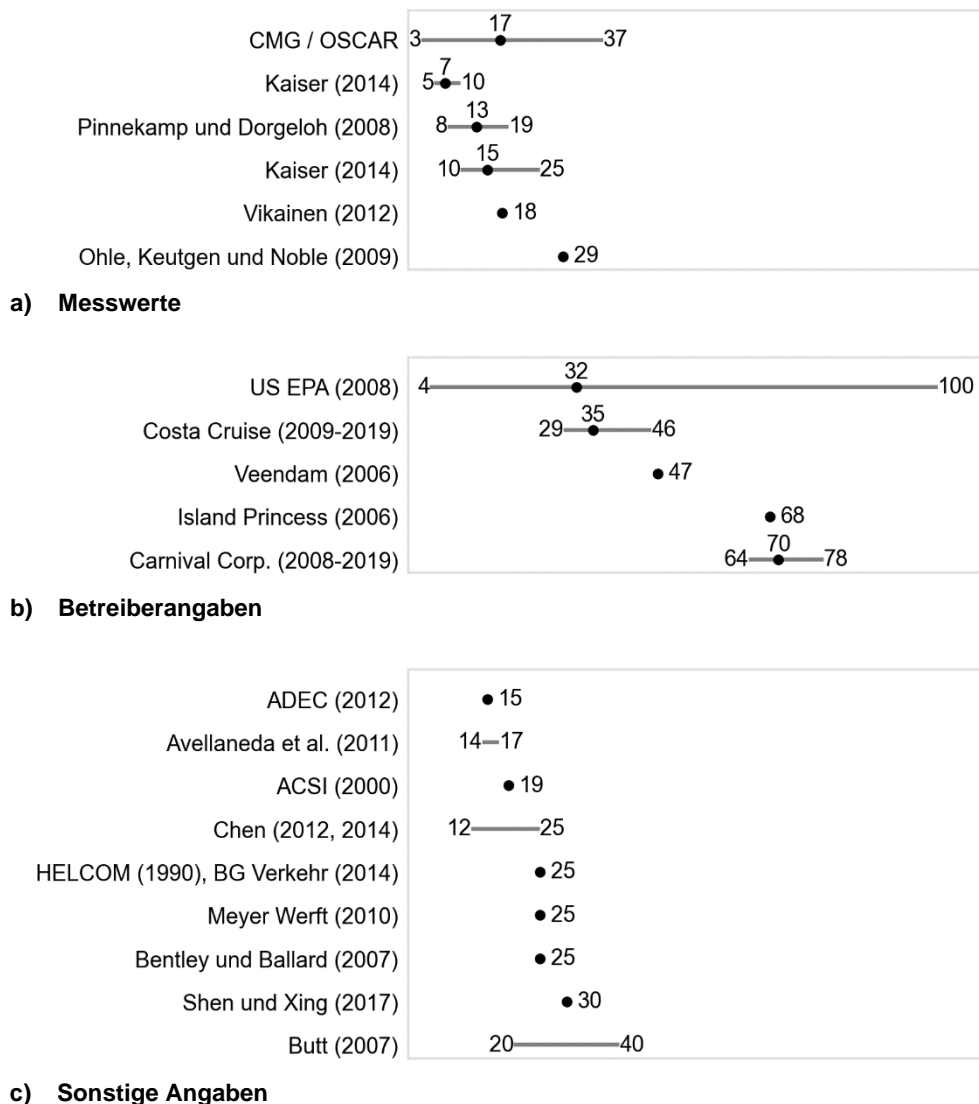


Bild 28 Daten zum personenspezifischen Schwarzwasseranfall (in L/(Pd))

Messwerte und sonstige Angaben zum Schwarzwasseranfall reichen von wenigen Litern bis zu 40 L/(Pd), wobei ca. drei Viertel der gemittelten Messwerte und Angaben in den Bereich von 13 bis 25 L/(Pd) fallen. Dies deckt sich auch weitgehend mit dem 15. und 85. Perzentil der von CMG bereitgestellten Daten (n = 109 Tage), die bei 12,5 und 21,9 L/(Pd) liegen. Auffällig ist, dass die Betreiberangaben eine deutlich größere Spannweite aufweisen und größtenteils deutlich über den Messwerten und sonstigen Angaben liegen. Mögliche Ursachen können neben Toiletten mit größerem Spülwasserbedarf auch die Ermittlung der Werte aus Permeatmengen der Schwarzwasser-Behandlung ohne Berücksichtigung anderer mitbehandelter Abwässer sowie Ungenauigkeiten bei der Einschätzung der anfallenden Volumina sein, da der Schwarzwasseranfall auf vielen Schiffen nicht separat gemessen wird.

Zum Tagesgang des Schwarzwasseranfalls an Bord lagen keinerlei Daten vor. Grundsätzlich ist der Schwarzwasseranfall eng an biologische Gegebenheiten geknüpft, die an Bord mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenso zutreffen wie an Land. Um plausible Annahmen bezüglich des zu erwartenden Tagesgangs treffen zu können, wurden daher Daten und Informationen aus siedlungswasserwirtschaftlichen und medizinischen Untersuchungen an Land kombiniert. Eine ausführliche Erläuterung des verwendeten Berechnungsansatzes und der zugrundeliegenden Daten findet sich in Abschnitt B.1.2. Der berechnete Schwarzwasseranfall sowie die resultierenden CSB- und TN-Frachten an einem Hafentag, einem Seetag und einem Wechseltag finden sich in Bild 29. Ausgehend von den getroffenen Annahmen ist morgens mit einer ausgeprägten Spitze der Schwarzwassermenge und -fracht zu rechnen, während in der Nacht voraussichtlich kaum Schwarzwasser anfällt. Bild 30 zeigt den aus der Berechnung resultierenden Tagesverlauf der CSB- und TN-Konzentration im Schwarzwasser. Die variierende Zusammensetzung im Tagesverlauf ist auf unterschiedliche Anteile von Fäzes und Urin zurückzuführen, für deren Anfall eine charakteristische, ungleich über den Tag verteilte Häufigkeit in medizinischen Studien (siehe bspw. Blanker et al., 2000, Burgio, Engel und Locher, 1991, Heaton et al., 1992, Shemerovskii, 2002) sowie im Rahmen abwassertechnischer Untersuchungen an Land (Friedler, Butler und Brown, 1996, Hellström und Kärrman, 1996, Rauch et al., 2003) festgestellt wurde. Aufgrund des größeren Anteils an Fäzes ist am Morgen eine höhere CSB-Konzentration zu erwarten. Die berechneten CSB-Konzentrationen stimmen gut mit den Messwerten überein (vgl. Bild 26). Die TN-Konzentration scheint durch das Berechnungsmodell mit den hier angesetzten Modellparametern tendenziell leicht überschätzt zu werden.

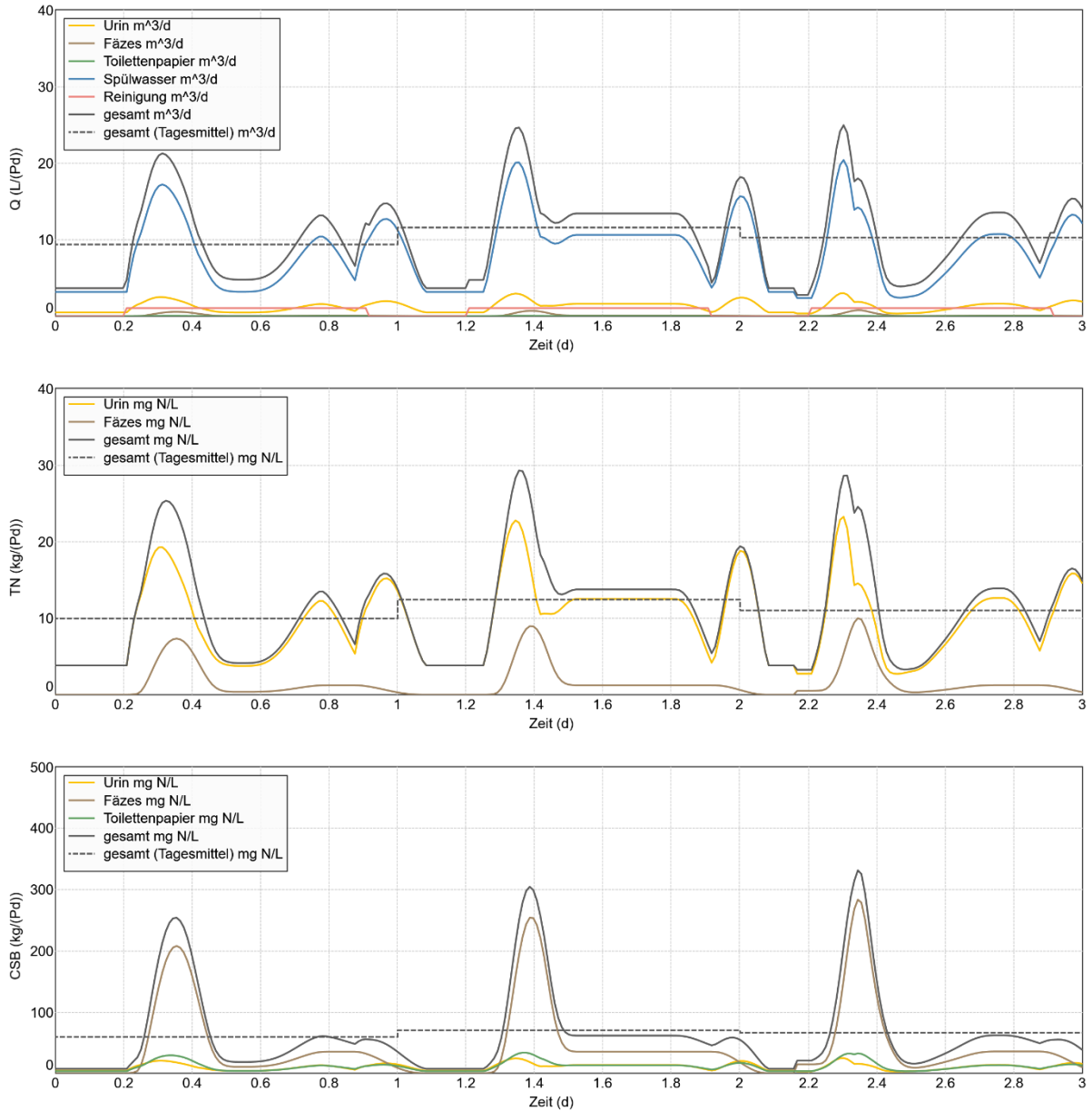


Bild 29 Berechnete Tagesverläufe des Anfalls (oben) sowie der TN-Fracht (Mitte) und CSB-Fracht (unten) des Schwarzwassers (Tag 1: Hafentag, Tag 2: Seetag, Tag 3: Wechseltag). Details zum Berechnungsansatz und den gewählten Beispielwerten finden sich in Abschnitt B.1.2.

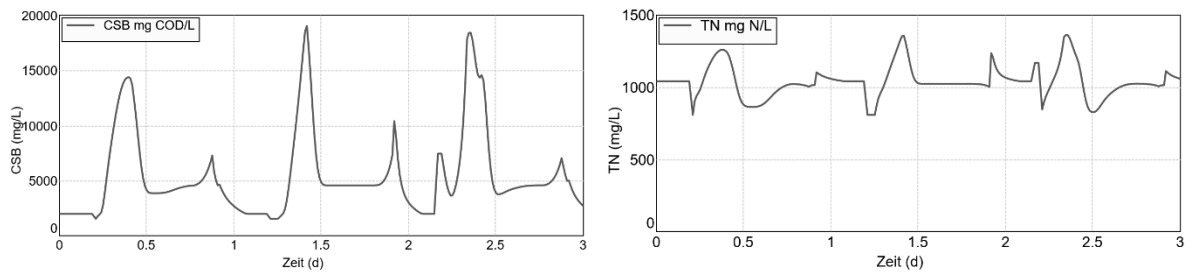
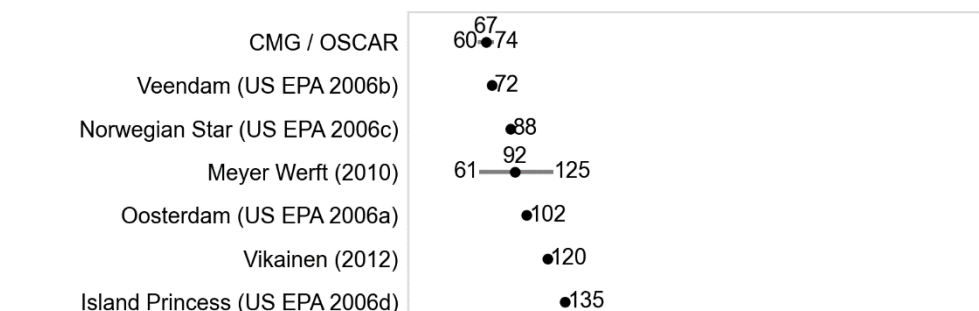


Bild 30 Berechneter Verlauf der CSB- und TN-Konzentration des Schwarzwassers (Tag 1: Hafentag, Tag 2: Seetag, Tag 3: Wechseltag). Details zum Berechnungsansatz und den gewählten Beispielwerten finden sich in Abschnitt B.1.2.

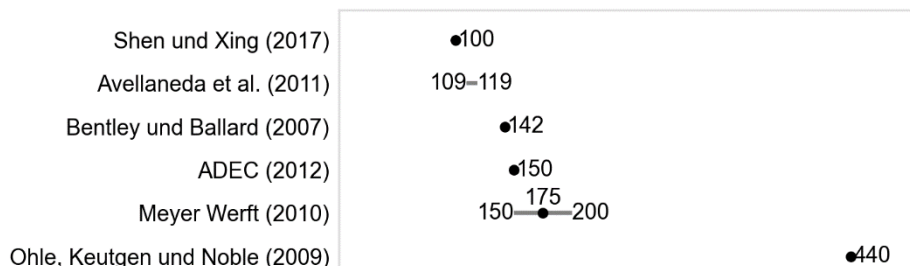
A.2.2 Kabinengrauwasser

Das Kabinengrauwasser zeichnet sich durch geringe bis mittlere CSB- und extrem geringe Nährstoffkonzentrationen aus, die zu 85% unter 550 mg CSB/L, 16 mg TN/L und 3 mg TP/L liegen.

Bild 31 zeigt die zusammengestellten Daten zum personenspezifischen Kabinengrauwasseranfall, gruppiert nach Herkunft der Daten. Messwerte (Bild 31a) bezeichnen tatsächlich gemessene Werte und sonstige Angaben (Bild 31b) umfassen Auslegungswerte und Werte, deren Ursprung in den jeweiligen Quellen nicht genauer spezifiziert wurde. Die Daten der von der US EPA untersuchten Schiffe (*Veendam*, *Oosterdam*, *Island Princess* und *Norwegian Star*) wurden über Massenbilanzen aus den vorhandenen Messungen und Angaben der Crew berechnet. Bei *Island Princess* und *Norwegian Star* wurde dafür ein Schwarzwasseranfall von 20 L/(Pd) angenommen.



a) Messwerte



b) Sonstige Angaben

Bild 31 Daten zum personenspezifischen Kabinengrauwasseranfall (in L/(Pd))

Die gemessenen personenspezifischen Kabinengrauwassermengen reichen von 60 bis 135 L/(Pd). Auslegungsempfehlungen und sonstige Angaben liegen im oberen Bereich der Messwerte und darüber mit 100 bis 200 L/(Pd) sowie einem sehr hohen von Ohle, Keutgen und Noble (2009) angegebenen Wert von 440 L/(Pd). Der Kabinengrauwasseranfall ist eng mit dem Verhalten der Passagiere und Crew verknüpft (z. B. Häufigkeit und Dauer von Duschen und Händewaschen). Einen weiteren Anteil hat die Kabinenreinigung, wofür jedoch keine separaten Daten für Kreuzfahrtschiffe vorliegen. Für Gästehäuser und Hotels an Land berichtet Gössling (2001) eine Wassernutzung von 12 bzw. 47 L/(Pd) für die Zimmerreinigung. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass unterschiedliche Armaturen und Wasserdrücke den Abwasseranfall beeinflussen (siehe z. B. Styles, Schoenberger und Galvez-Martos, 2015).

Der aus aufgezeichneten Tankfüllständen ermittelte Tagesgang des Kabinengrauwasseranfalls während 8 Tagen einer Karibikkreuzfahrt (siehe auch Abschnitt A.1.2) ist in Bild 32 dargestellt.

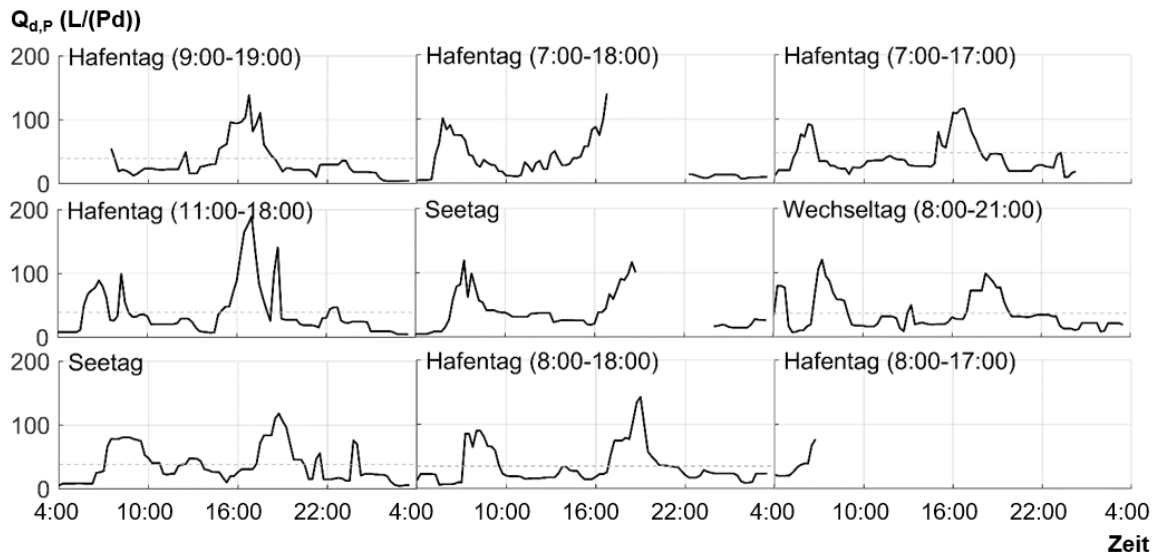


Bild 32 Tagesgang des Kabinengrauwasseranfalls während einer Karibik-Kreuzfahrt, ermittelt aus Tankfüllständen (3 von 5 Kabinengrauwassersammeltanks). Gestrichelte Linien entsprechen den Tagesmittelwerten. Aufgrund von Unregelmäßigkeiten bei der Speichertanknutzung wurden die an Tag 2 und 5 fehlenden Daten von der Auswertung ausgenommen.

Der Tagesgang des Kabinengrauwasseranfalls weist morgens und am späten Nachmittag/frühen Abend deutliche Spitzen auf. Nachts ist der Abwasseranfall sehr gering. Die morgendlichen Spitze und der sehr geringe nächtliche Abwasseranfall sind typisch für Grauwasser aus Badezimmern an Land (Blokker et al., 2011, Deng und Burnett, 2002, Murat Hocaoglu et al., 2010, Wheatley und Surendran, 2008). Während die zweite Spitze an Land in der Regel am Abend (nach Ende der Aktivitäten des Tages/vor dem Zubettgehen) auftritt, beginnt die zweite Spitze in den ausgewerteten Daten von Bord bereits am Nachmittag, meist zwischen 14:00 und 16:00 Uhr, und ist insbesondere an Tagen mit Landgang stärker ausgeprägt als die Morgenspitze. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass die Passagiere bevorzugt nach dem Landgang bzw. vor dem Abendessen duschen, was anhand der vorhandenen Informationen aber nur gemutmaßt werden kann.

A.2.3 Küchenabwasser

Das Küchenabwasser weist im Vergleich zu den anderen Grauwasserströmen deutlich höhere CSB-Konzentrationen über einen weiten Bereich von ca. 160 bis 8.900 mg/L auf, wobei 85% der Werte unter 3000 mg/L liegen. Mit max. 126 mg TN/L und bis zu 20 mg TP/L liegen die Stickstoff- und Phosphorgehalte ebenfalls höher als die des Kabinen- und Wäschereiabwassers (sofern keine phosphorhaltigen Reinigungsmittel verwendet werden), aber noch deutlich unter denen des Schwarzwassers.

Die gesammelten Daten zum personenspezifischen Küchenabwasseranfall sind in Bild 33 dargestellt, gruppiert nach Herkunft der Daten. Messwerte (Bild 33a) bezeichnen tatsächlich gemessene Werte, Betreiberangaben (Bild 33b) entstammen Nachhaltigkeitsberichten der Reedereien oder Angaben der Crew und sonstige Angaben (Bild 33c) umfassen Auslegungsempfehlungen und Werte, deren Ursprung in den jeweiligen Quellen nicht genauer spezifiziert wurde. Die Daten der *Oosterdam* wurden aus den vorhandenen Messungen unter Annahme eines Schwarzwasseranfalls von 20 L/(Pd) über eine Massenbilanz berechnet.

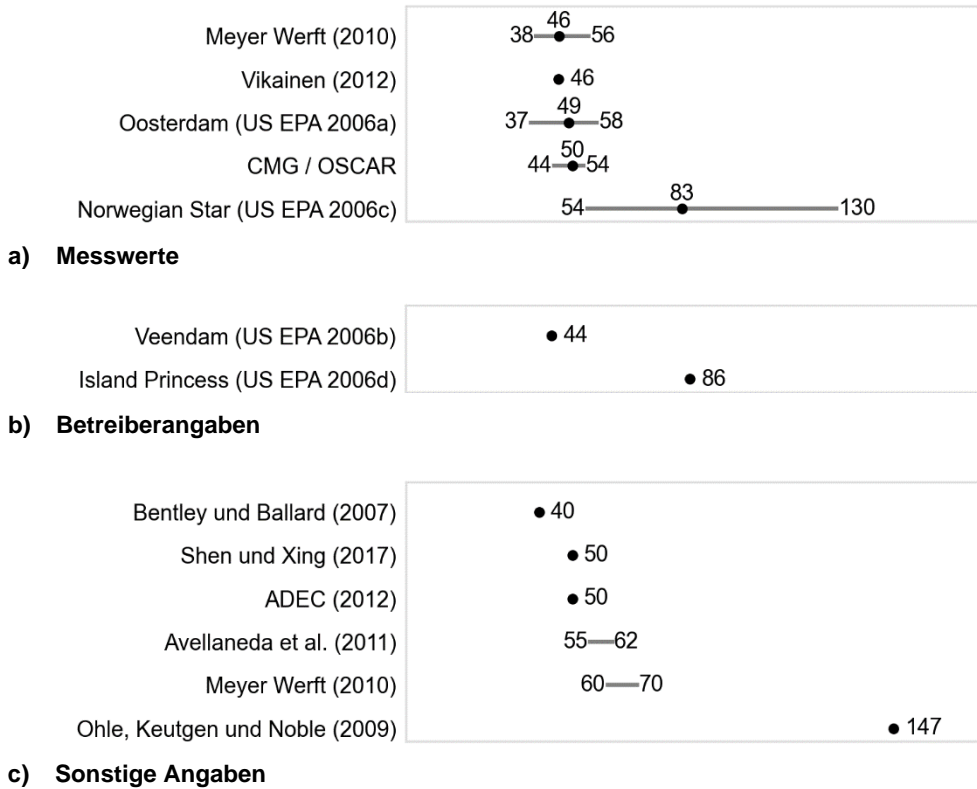


Bild 33 Daten zum personenspezifischen Küchenabwasseranfall (in L/(Pd))

Die Mittelwerte des personenspezifischen Küchenabwasseranfalls liegen größtenteils bei 44-50 L/(Pd). Abgesehen von der *Norwegian Star* weisen die Werte einzelner Schiffe nur geringe Spannweiten bis ± 12 L/(Pd) auf. Die Messungen auf der *Norwegian Star*, Angaben der Crew der *Island Princess* und die in Ohle, Keutgen und Noble (2009) angegebenen Werte weisen darauf hin, dass auch höhere Küchenabwassermengen bis zu knapp 150 L/(Pd) auftreten können. Naheliegende Gründe für den unterschiedlich hohen personenspezifischen Küchenabwasseranfall sind unterschiedlich viele servierte Mahlzeiten bzw. Gedecke pro Person und Tag, wobei auch die Art der Mahlzeiten einen Einfluss haben kann. Die dazu vorliegenden Daten reichen von 2,6 bis 5,8 Gedecke/(Pd) (Daten von CMG sowie US EPA, 2006a, 2006b, 2006c, 2006d). Ein weiterer möglicher Faktor ist die Wassereffizienz der Küchenausstattung. Für die Schiffe, für die Informationen zur Anzahl servierter Gedecke pro Person vorlagen, wurde der Küchenabwasseranfall in L/Gedeck berechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 34 dargestellt.

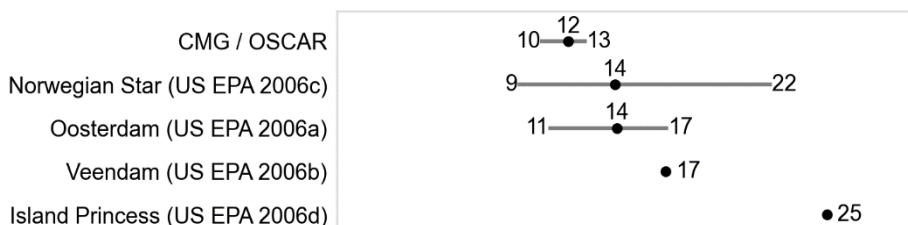


Bild 34 Küchenabwasseranfall pro Gedeck (in L/Gedeck)

Die resultierenden Werte im Bereich von 9 bis 25 L/Gedeck liegen in einem ähnlichen Bereich wie für verschiedene Restaurants und Großküchen an Land berichtete Werte, die von 5 bis 35 L/Gedeck reichen, wobei vereinzelt auch höhere Werte bis zu 120 L/Gedeck für Luxusrestaurants und Hotels berichtet werden (Bachon, 1993, 1994, British Water, 2013, Dziegielewski, 2000, International Tourism Partnership, 2008, Stoll und Gupta, 1997, Styles, Schönberger und Galvez Martos, 2013). Aus den

gedeckspezifischen Daten ist zu erkennen, dass der vergleichsweise höhere Küchenabwasseranfall auf der *Norwegian Star* auf die größere Anzahl an Gedecken pro Passagier zurückzuführen ist, während die Angaben zur *Island Princess* eher auf eine schlechtere Wassereffizienz der Küche hinweisen (ebenso möglich ist, dass der Abwasseranfall überschätzt wurde). Die Angabe des Küchenabwasseranfalls in L/Gedeck bietet einen ursächlicheren Bezug, der zudem einen direkten Vergleich der Wassereffizienz der Küche erlaubt, und ist daher dem personenspezifischen Abwasseranfall vorzuziehen.

Der aus den von CMG bereitgestellten Tankfüllstandsdaten (siehe Abschnitt A.1.2) berechnete Tagesgang des Küchenabwasseranfalls ist in Bild 35 dargestellt (8 Tage einer Karibik-Kreuzfahrt).

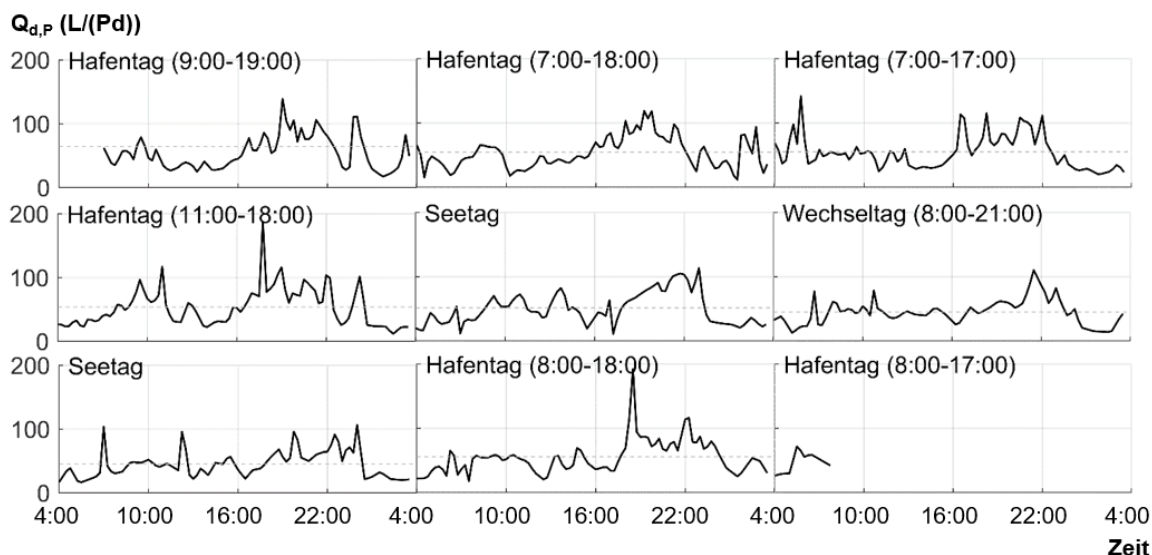


Bild 35 Tagesgang des Küchenabwasseranfalls (inkl. vernachlässigbar geringer Mengen Speiserestpresswasser) während einer Karibik-Kreuzfahrt, ermittelt aus Tankfüllständen. Gestrichelte Linien entsprechen den Tagesmittelwerten.

Küchenabwasser fällt sowohl tagsüber als auch nachts an (laut Angaben der Crew laufen die Topfspülmaschinen rund um die Uhr). Die Tagesgänge weisen Spitzenwerte von bis zu ca. 2 bis 2,5-fachen des Tagesmittelwertes auf. Der höchste Abwasseranfall tritt während und nach Mahlzeiten, insbesondere am späten Nachmittag und Abend und in geringerem Maße nach dem Frühstück, auf. Dies sind die Zeiten, in denen die Geschirrspülmaschinen vorrangig laufen. An den Seetagen und dem Wechseltag sind die Spitzen weniger stark ausgeprägt. Eine genauere Analyse des Tagesganges würde detailliertere Informationen zu den Abläufen in der Küche und vermutlich auch eine größere Datengrundlage erfordern, als im Rahmen des Projektes eingeholt werden konnte.

A.2.4 Wäschereiabwasser

Das Wäschereiabwasser weist sehr ähnliche CSB- und Nährstoff-Konzentrationen wie das Kabinengrauwasser auf, wobei 85% der Werte unterhalb von 550 mg CSB/L, 20 mg TN/L und 3 mg TP/L liegen.

Bild 36 gibt einen Überblick über die gesammelten Daten zum personenspezifischen Wäschereiabwasseranfall, gruppiert nach Herkunft der Daten. Messwerte (Bild 36a) bezeichnen tatsächlich gemessene Werte, Betreiberangaben (Bild 36b) entstammen Nachhaltigkeitsberichten der Reedereien oder Angaben der Crew und sonstige Angaben (Bild 36c) umfassen Auslegungsempfehlungen und Werte, deren Ursprung in den jeweiligen Quellen nicht genauer spezifiziert wurde.

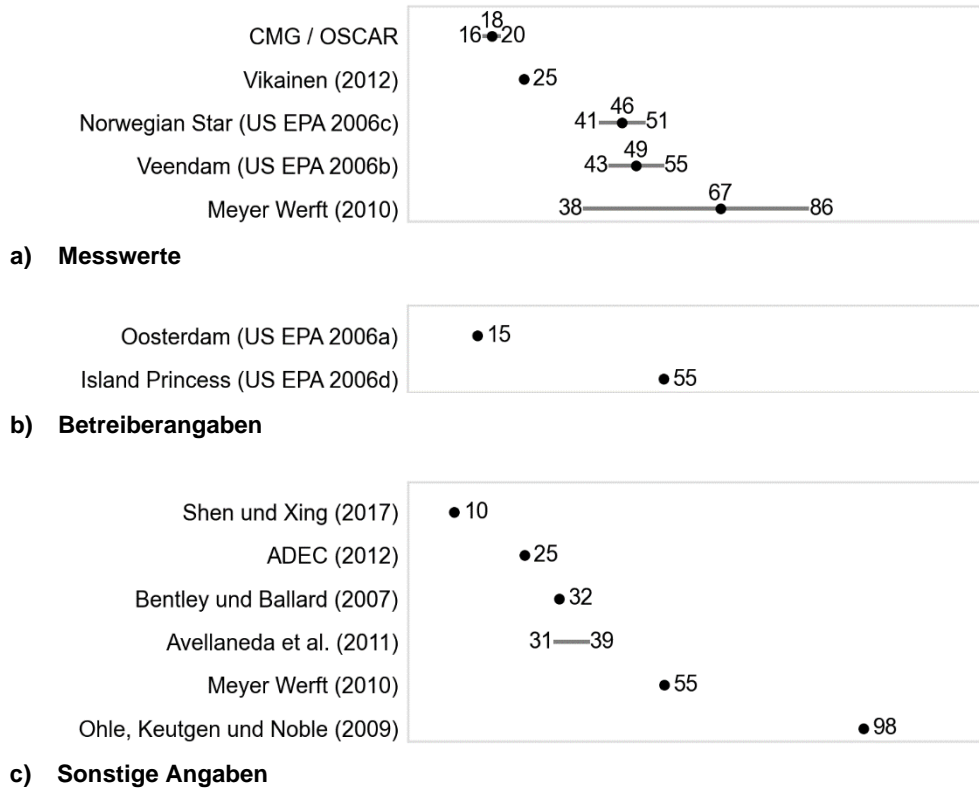


Bild 36 Daten zum personenspezifischen Wäschereiabwasseranfall

Messwerte und Angaben zum Wäschereiabwasseranfall variieren von 10 bis 98 L/(Pd). Der Wäschereiabwasseranfall ist in erster Linie abhängig von Menge der gewaschenen Wäsche und den verwendeten Waschmaschinentypen. Aus den von CMG bereitgestellten Wäschereiprotokollen (siehe Abschnitt A.1.3) wurden personenspezifische Wäschemengen von 1,2 bis 1,6 kg/(Pd) ermittelt. Dies liegt etwas unter typischen Wäschemengen in Hotels an Land, die mit ca. 1,8 bis 5 kg/(Pd) beziffert werden (Bohdanowicz und Martinac, 2007, EDRO Corp., 2015, Electrolux, 2009, Styles, Schoenberger und Galvez-Martos, 2015). Zusammen mit dem konkreten Wasserbedarf der Waschmaschinen, der den technischen Datenblättern entnommen werden kann, kann der zu erwartende Wäschereiabwasseranfall fallspezifisch eingegrenzt werden. Dabei ist zu bedenken, dass die Maschinen nicht immer bei voller Kapazität betrieben werden. Die Auswertung der Wäschereiprotokolle ergab bspw. eine mittlere Auslastung von ca. 70% der maximal möglichen Beladung. Unter Ansatz üblicher Wasserbedarfe moderner Waschmaschinen, die je nach Typ bei rund 5 bis 25 L/kg liegen (DWA, 2010, EDRO Corp., 2015, Electrolux, 2009, Gosolits, Klein und Kurz, 2000, Styles, Schoenberger und Galvez-Martos, 2015, US EPA, 2000), ergibt sich eine große Bandbreite von 9 bis 125 L/(Pd) Wäschereiabwasser, die sich mit den in Bild 36 gezeigten Daten deckt. Um eine belastbare Abschätzung für den Einzelfall zu erhalten, sind dementsprechend fallspezifische Werte anzusetzen. Zudem wird daraus deutlich, dass durch effiziente Waschmaschinen und die Verringerung der zu waschenden Wäschemenge der Wasserbedarf und der Abwasseranfall der Wäscherei substantiell minimiert werden können.

Der Tagesgang des Wäschereiabwasseranfalls wurde aus den Wäschereiprotokollen und technischen Daten der Waschmaschinen (siehe Abschnitte A.1.3 und A.1.4) approximiert und ist in Bild 37 dargestellt.

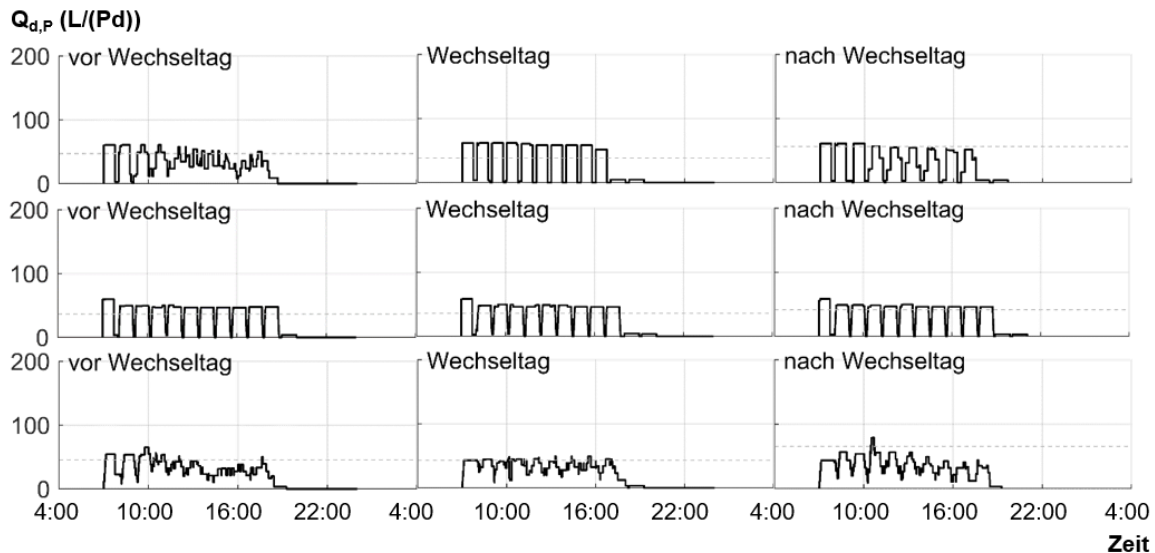


Bild 37 Tagesgang des Wäschereiabwasseranfalls an Wechseltagen sowie jeweils einen Tag davor und danach während Kreuzfahrten in der Karibik. Berechnet aus Wäschereiprotokollen und technischen Daten der Waschmaschinen von Schiff B. Gestrichelte Linien entsprechen den Tagesmittelwerten.

Der Abwasseranfall ist relativ konstant während der Betriebszeiten der Wäscherei. An einigen Tagen ist ein leicht abnehmender Trend zum Ende der Betriebszeit hin zu erkennen, der von einer ungleichmäßigen Verteilung der Wäschemengen über den Tag herrührt. Je nach Betriebszeiten und Organisation der Wäscherei ist davon auszugehen, dass es auf verschiedenen Schiffen große Unterschiede im Tagesgang des Wäschereiabwasseranfalls gibt. Anhand von Informationen zu den Betriebszeiten und Abläufen in der Wäscherei sowie der technischen Ausstattung kann der Tagesgang schiffsspezifisch abgeschätzt werden.

A.2.5 Presswasser aus der Speiserestentwässerung

Bei der Entwässerung der an Bord anfallenden Speisereste entstehen vergleichsweise geringe Abwassermengen, die jedoch sehr hoch belastet sind. Menge und Konzentration der anfallenden Abwässer hängen vom zum Transport der Speisereste verwendeten System ab. Dazu kommen Vakuumsysteme oder sogenannte „Food Pulper“ zum Einsatz. Bei der Verwendung von Vakuumsystemen werden die Speisereste ohne Zusatz von Wasser transportiert. Viele mit Vakuumsystemen ausgestattete Schiffe verfügen über die Möglichkeit Speisereste zur Verringerung des zu speichernden Volumens zu entwässern, wenn keine direkte Entsorgung (Abgabe an Land oder ins Meer, siehe auch Abschnitt 2.1) erfolgt. Im Falle der Food Pulper werden die Speisereste mit Wasser versetzt, um sie pumpfähig zu machen, und anschließend entwässert. Das dabei ausgeschleuste Wasser wird recycelt und von Zeit zu Zeit abgeschlagen und erneuert. Da auf den in OSCAR betrachteten Schiffen Vakuumsysteme verwendet werden, beschränken sich die folgenden Angaben auf diese Systeme.

Zur Abwasserzusammensetzung liegen lediglich Daten einer Probe von Bord vor. Daher wurden ergänzend Daten aus Speiserestrecyclinganlagen an Land hinzugezogen. Die gesammelten Daten sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5 Zusammensetzung von Speiserestpresswässern

	Quelle	CSB (mg/L)	TN (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	CSB:TN (g/g)	TP (mg/L)	pH
an Bord	NAUTEK	144.750	3.825	-	37,8	-	-
Speiserestrecycling- anlagen (an Land)	Jang et al. (2015)	164.250	1.740	-	94,4	2.040	4,1
	Lee et al. (2009)	161.170	5.280	360	30,5	880	5,0
	Behera et al. (2010)	210.000	5.100	-	41,2	800	3,6
	Han, Behera und Park (2012)	238.660	7.350	1.200	32,5	1.200	4,0

Die in der Probe an Bord gemessenen Konzentrationen liegen in einem ähnlichen Bereich wie die Daten aus Speiserestrecyclinganlagen an Land und weisen extrem hohe Konzentrationen an CSB, TN und TP auf. Die vorhandenen Daten lassen vermuten, dass ein wesentlicher Anteil des Stickstoffs als organischer Stickstoff gebunden vorliegt. Auffällig ist zudem der sehr niedrige pH-Wert, der vermutlich auf die Versäuerung der Speisereste während der Lagerung zurückzuführen ist und auf einen hohen Gehalt an biologisch leicht abbaubaren organischen Säuren hindeutet.

Die personenspezifische Menge an Speiserestpresswasser kann aus einer Massenbilanz abgeschätzt werden: Ausgehend von einer Erhöhung des Trockenrückstandes von bspw. 20% auf 25% durch die Entwässerung und einem Speiserestanfall von 1,4-3,5 kg/(Pd) (Schumüller, Weichgrebe und Köster, 2021) ergibt sich eine Speiserestpresswassermenge von knapp 0,3-0,7 L/(Pd). Vikainen (2012) gibt einen etwas höheren Speiserestpresswasseranfall von 1,8 L/(Pd) an.

Speiserestpresswasser fällt ausschließlich während der Entwässerung an, die üblicherweise für einige Stunden und nicht täglich läuft (je nach Betriebsabläufen und äußeren Umständen, z. B. Abgabemöglichkeiten, vgl. Abschnitt 2.1).

A.2.6 Zentrat aus der Überschussschlamm- und Siebrückstandsentwässerung

Überschussschlamm und Siebrückstände (sogenannter „Biosludge“) werden typischerweise mittels Dekanterzentrifugen entwässert. Zur Menge und Beschaffenheit des dabei anfallenden Zentrates liegen nur wenige Informationen aus der Literatur vor.

Typische Werte für die Zentratzusammensetzung an Land liegen bei 800 bis 4000 mg CSB/L, 100 bis 500 mg TN/L und 5 bis 20 mg P/L (Henze, 2008). Aus der Überschussschlammentwässerung an Land ist bekannt, dass die Zusammensetzung des Zentrates von den Bedingungen (aerob/anaerob) und der Dauer der Lagerung des entnommenen Schlamms vor der Entwässerung abhängt. Längere Lagerzeiten führen zur Rücklösung von Phosphor und Ammonium und einem Anstieg der CSB-Konzentration im Zentrat (Meyer und Wilderer, 2004, Pitman, 1999).

Der personenspezifische Zentratanfall kann, analog zum Vorgehen für das Speiserestpresswasser (Abschnitt A.2.5), aus der Menge an entwässertem Material und der Erhöhung des TS durch die Entwässerung über eine Massenbilanz abgeschätzt werden. Dieses Vorgehen hat zudem den Vorteil, dass schiffsspezifische Unterschiede beim Betrieb der Schiffskläranlage und der Entwässerung berücksichtigt werden können. Als Anhaltspunkt sind die theoretisch resultierenden Zentratmengen für 6 Schiffe, zu denen die benötigten Daten vorlagen, in Tabelle 6 zusammengefasst. Dabei wurde ein TS von 200 g/L (20%) nach Entwässerung zugrunde gelegt.

Tabelle 6 Abschätzung des personenspezifischen Zentratanfalls aus der Entwässerung von Überschussschlamm und Siebrückständen (basierend auf einer Feststoffkonzentration von 200 g TS/L im entwässerten Schlamm)

	Überschussschlamm			Siebrückstände			Gesamt
	Q m ³ /d	TS g/L	Zentrat L/(Pd)	Q m ³ /d	TS g/L	Zentrat L/(Pd)	Zentrat L/(Pd)
Island Princess (US EPA, 2006d) 7,8	1,4 ^{1,2}	15,8	0,5	50 kg/d	338	0	0,5
Norwegian Star (US EPA, 2006c)	25 ^{1,3}	9,5 ^{3,4}	6,4	<i>im Überschussschlamm enthalten</i>			6,4
Veendam (US EPA, 2006b)^{7,8}	15 ¹	13	7,7	0,58 ¹	27	0,3	8,0
Schiff Typ 2 (OSCAR)	44 ⁵	10,5 ⁵	8,7 ⁶	n/a	400	0	≤ 8,7
Oosterdam (US EPA, 2006a)^{7,8}	25 ¹	15 ⁴	8,8	190 ¹	n/a	n/a	8,8
Schiff Typ 1a (OSCAR)	30,8 ⁵	10,9 ⁵	11,1 ⁶	n/a	400	0	≤ 11,1

¹ Angaben der Crew

² Angabe zum Überschussschlammfall (entsprechend 7,7 g TS/(Pd)) unrealistisch gering

³ max. 25 m³ Überschussschlamm und Siebrückstände pro Tag; Zielgröße Reaktor-TS= 9-10 mg/L (ohne Siebrückstände)

⁴ Zielgröße Reaktor-TS

⁵ Mittelwert über 370 Tage (Schiff Typ 1a)/180 Tage (Schiff Typ 2), berechnet aus Aufzeichnungen zu Überschussschlammvolumen und Reaktor-TS

⁶ berechnet anhand der tatsächlichen Anzahl an Personen an Bord (tagesscharf), Mittelwert über 345 Tage (Schiff Typ 1a)/180 Tage (Schiff Typ 2)

⁷ Siebrückstände werden an Land entsorgt, an Bord verbrannt oder unentwässert über Bord gegeben

⁸ Überschussschlamm wird eigentlich unentwässert über Bord gegeben

Die berechneten Zentratmengen liegen im Bereich von 6,7 bis 11,4 L/(Pd) und damit leicht über den in Vikainen (2012) angegebenen 5 L/(Pd). Lediglich der für die *Island Princess* berechnete Wert von 0,5 L/(Pd) ist deutlich geringer, was vermutlich auf eine deutliche Unterschätzung des Überschussschlammfalls zurückzuführen ist, der mit umgerechnet 7,7 g TS/(Pd) unrealistisch gering ist (ca. 60-150 g TS/(Pd) auf den anderen Schiffen).

Die Biosludge-Entwässerung läuft ebenso wie die Speiserestentwässerung über mehrere Stunden und findet nicht täglich statt (je nach Betriebsabläufen und äußeren Umständen, z. B. Abgabemöglichkeiten, vgl. Abschnitt 2.1).

A.2.7 Brüdenkondensat aus der Trocknung

Zur weiteren Verringerung des zu speichernden Volumens oder als Vorbereitung für die anschließende Verbrennung können entwässerte Speisereste, Überschussschlamm und Siebrückstände an Bord getrocknet werden, typischerweise bis zu einem TS von 60-70%.

Zur Zusammensetzung des dabei entstehenden Brüdenkondensats liegen keine Messwerte von Bord vor. Grundsätzlich ist damit zu rechnen, dass sowohl flüchtige organische Stoffe als auch Ammonium bei der Trocknung in das Kondensat übergehen können und entsprechend hohe CSB- und NH₄-N-

Konzentrationen vorliegen können. Neben den Betriebsbedingungen (Temperatur, Druck, Trocknungsdauer) und der Anlagentechnik (Trockner- und Kondensatortyp) spielt dabei vor allem die Beschaffenheit der zu trocknenden Ausgangsstoffe eine Rolle. Brüdenkondensate aus der Klärschlamm-trocknung an Land weisen daher eine große Bandbreite an Konzentrationen auf, die von ca. 100 bis zu 13.000 mg CSB/L (Li et al., 2015, Reiter und Beier, 2023 und Quellen darin) und 45 bis über 3.000 mg NH₄-N/L (Reiter und Beier, 2023 und Quellen darin) reichen. Im Vergleich dazu enthalten bei der Trocknung von Speiseresten entstehende Kondensate höhere Konzentrationen an CSB von ca. 13.000 bis über 20.000 mg/L, erreichen jedoch mit ca. 80 bis 150 mg TN/L nicht so hohe Stickstoffgehalte (Chae und Shin, 2007, Han, 2017, Kamperidis et al., 2022, Kim Min-Kyung et al., 2020). Insgesamt ist davon auszugehen, dass die an Bord anfallenden Brüdenkondensate aufgrund der mitgetrockneten Speisereste und des in der Regel unstabilierten Klärschlammes innerhalb der oben genannten Bandbreiten hohe Konzentrationen an CSB und mittlere bis hohe Konzentrationen an NH₄-N aufweisen.

Zum Kondensatanfall liegen keine Daten vor. Die Abschätzung über eine Massenbilanz mit den zuvor getroffenen Annahmen für die Speiserest- und Biosludge-Entwässerung (siehe Abschnitte A.2.5 und A.2.6) ergibt einen Kondensatanfall von ca. 0,6 L/(Pd) aus den Speiseresten und ca. 0,3 L/(Pd) aus dem Biosludge.

Die Trocknung wird nach Angaben von CMG eher selten betrieben. Bei Betrieb läuft der Trocknungsvorgang kontinuierlich über einige Stunden.

Anhang B Modellierungsansätze

B.1 Zulaufprognosemodell

Im Folgenden sind die Modellierungsansätze für das in OSCAR entwickelte Zulaufprognosemodell dargestellt (siehe auch Abschnitt 3.2.2). Das Modell basiert auf einem phänomenologischen Ansatz, der Hintergrundwissen zu theoretischen Zusammenhängen mit beobachteten Daten verknüpft. Anhand der vorliegenden Daten (siehe Anhang A), ergänzt um Daten und Informationen aus der Literatur, wurden wesentliche Einflussfaktoren auf den Abwasseranfall identifiziert und die entsprechenden Zusammenhänge mathematisch beschrieben. Zur Beschreibung der Anfallzeiten des Abwassers bzw. der dahinterstehenden Aktivitäten werden im Modell Wahrscheinlichkeitsverteilungen genutzt. Aufgrund der intuitiven Parametrierbarkeit und guten Übereinstimmung mit den beobachteten Daten kommen dabei (modifizierte) PERT-Verteilungen zum Einsatz (Vose, 2010).

Der für die Abwasserzusammensetzung verwendete Parametervektor kann grundsätzlich passend zu den für die biologische Stufe verwendeten Modellierungsansätzen frei gewählt werden, solange die Parameter für die einzelnen Teilströme und, im Falle des Schwarzwassers, für Urin, Fäzes und Toilettenpapier bekannt sind bzw. abgeschätzt werden können.

Die Entwicklung und beispielhafte Implementierung des Zulaufprognosemodells erfolgte z. T. im Rahmen einer durch das ISAH betreuten studentischen Arbeit (Miricho, 2021).

Sofern ein ausreichend großer Datensatz zum Abwasseranfall vorhanden ist, könnten für die Modellierung des Abwasseranfalls auch datengetriebene Methoden (z. B. maschinelles Lernen) genutzt werden. Die für das phänomenologische Modell identifizierten Einflussfaktoren liefern einen Anhaltspunkt, welche Informationen sinnvollerweise als Eingaben für datengetriebene Modelle dienen können.

B.1.1 Modellierung des Passagier- und Crewverhaltens

Der Anfall des Schwarzwassers und des Kabinengrauwassers sind eng mit dem Verhalten der Passagiere und der Crew verknüpft. Zeitpunkt, Art und Häufigkeit der Toiletten- und Badnutzung werden von den Zeiten des Aufstehens, Zubettgehens und der Landgänge beeinflusst. Daher werden diese grundlegenden Aktivitäten in einem separaten Teilmodell abgebildet, das Eingangsdaten für das Schwarzwasser- und das Kabinengrauwassermodell liefert. Um verschiedene Verhaltensmuster je nach Tagesaktivitäten abzubilden, werden vier "Personentypen" unterschieden:

- Personen, die den gesamten Tag an Bord verbringen,
- Personen, die einen Landgang machen,
- Personen, die ausschiffen,
- Personen, die einschiffen.

Vereinfachend wird hier nicht zwischen Passagieren und Crew unterschieden. Eine solche Unterscheidung könnte aber leicht im Modell ergänzt werden.

Für jeden Personentyp werden die Zeiten des Aufstehens und des Zubettgehens als Wahrscheinlichkeitsverteilungen hinterlegt. Für Landgänge, An- und Abreise werden zusätzlich die Zeiten des An-Bor-Gehens bzw. Verlassens des Schiffes vorgegeben. Die Unterscheidung der Personen nach Tagesaktivitäten erlaubt neben der Definition unterschiedlicher Schlafenszeiten auch unterschiedliche Verhaltensmuster bzgl. der abwassererzeugenden Aktivitäten zu definieren (siehe Abschnitt B.1.3). Die für die in den folgenden Abschnitten durchgeführten Beispielrechnungen genutzten Modellparameter sind in Tabelle 7 und Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 7 Für die Beispielrechnung genutzte Aufsteh- und Schlafenszeiten für See-, Hafen- und Wechseltage

		Min.	Median	Max.	γ
Seetag	Aufstehen	6:00	8:00	10:00	3
	Zubettgehen	22:00	24:00	2:00	3
Hafentag	Aufstehen	5:00	6:30	10:00	3,5
	Zubettgehen	21:00	22:30	2:00	3,5
Wechseltag	Aufstehen	5:00	7:00	8:00	4
	Zubettgehen	21:00	23:00	2:00	3,5

Tabelle 8 Anteil der Personen und Parameter der zeitlichen Verteilung von Landgängen, Ein- und Ausschiffen für die Beispielrechnung

		Anteil (%)	Min.	Median	Max.	γ
Hafentag	Beginn Landgang	70	9:00	10:00	13:00	3
	Rückkehr vom Landgang		14:00	17:00	19:00	4
Wechseltag	Beginn Landgang	25	8:30	9:30	11:00	4
	Rückkehr vom Landgang		14:00	16:00	18:00	4
	Ausschiffen	50	8:30	9:30	10:30	3
	Einschiffen	51	12:00	14:00	18:00	4

B.1.2 Schwarzwasser

Das Schwarzwasserprognosemodell schätzt den Schwarzwasseranfall aus der Anzahl der Personen an Bord n_P sowie deren Wach- und Schlafzeiten ab. Bei der Berechnung der Schwarzwasserzusammensetzung werden die im Tagesverlauf variierenden Anteile an Fäzes und Urin berücksichtigt. Dafür werden zwei Arten von Spülvorgängen definiert: nur Urin (U) und Fäzes und Urin (FU). Hinzu kommen Toilettenspülungen im Zusammenhang mit der Toilettenreinigung (R). Tabelle 9 gibt einen Überblick über die definierten Typen von Spülvorgängen. Typische Werte für die Mengen und Zusammensetzungen von Urin, Fäzes, Toilettenpapier und Spülwasser können Tabelle 10 entnommen werden.

Tabelle 9 Zusammensetzung der verschiedenen Typen von Spülvorgängen

	Urin	Fäzes	Toilettenpapier	Spülwasser
nur Urin (U)	$V_{d,Urin}/(n_{d,U} + n_{d,FU})$	-	$n_{Blatt,U}$	$n_{Spülung,U} V_{Spülung}$
Fäzes und Urin (FU)	$V_{d,Urin}/(n_{d,U} + n_{d,FU})$	$m_{d,Fäzes}/n_{d,FU}$	$n_{Blatt,FU}$	$n_{Spülung,FU} V_{Spülung}$
Toilettenreinigung (R)	-	-	-	$n_{Spülung,K} V_{Spülung}$

$V_{d,Urin}$	tägliches Gesamtvolumen an Urin
$m_{d,Fäzes}$	tägliche Gesamtmasse an Fäzes
n_d	Anzahl der Harnabgänge bzw. Defäkationen pro Tag
n_{Blatt}	Anzahl Toilettenpapierblätter pro U bzw. FU
$n_{Spülung}$	Anzahl der Spülbetätigungen pro U, FU bzw. K
$V_{Spülung}$	Spülwasservolumen pro Spülbetätigung

Tabelle 10 Typische und abgeschätzte Werte für die Menge und Zusammensetzung von Urin, Fäzes, Toilettenpapier und Spülwasser. Typische Bandbreiten sind in Klammern angegeben.

	Menge	CSB	TN	TP	TS
Urin ^a	1,45 (1-2,1) L/(Pd) 7 (6-10) Harnabgänge/d	8,2 (6-17,5) g/L	7,7 (4-13,9) g N/L	0,65 (0,3-2,5) g P/L	0,5 ^f g/L
Fäzes ^b	130 (100-400) g/(Pd) 1 Stuhlgang/Tag	360 (285-430) mg/g	12,7 (5-17,5) mg N/g	5 (1,8-10) mg P/g	177 (46-462) mg/g
Toilettenpapier ^c	1,88 Blatt/U 6,6 Blatt/FU	706 mg/Blatt	0 mg/Blatt	0 mg/Blatt	546 mg/Blatt
Spülwasser	1,2 L/Spülung ^d 1,1 Spülungen/U ^e 1,4 Spülungen/FU ^e 0,7 Spülungen/(Pd) zur Reinigung ^e	0 mg/L	0 mg/L	0 mg/L	0 mg/L

^a basierend auf Lindeboom et al. (2020), Bisinella de Faria et al. (2020), van Haarst (2015), Rose et al. (2015), Larsen, Udert und Lienert (2013), Meininger und Oldenburg (2009), Parsons et al. (2007), Mueller et al. (2005), Almeida, Butler und Friedler (1999), Hellström und Kärrman (1996), Burgio, Engel und Locher (1991) und Quellen darin

^b basierend auf Rendtorff und Kashgarian (1967), Cummings et al. (1992), Lewis und Heaton (1997), Almeida, Butler und Friedler (1999), Hosseini-Assal und Hosseini (2000), Meininger und Oldenburg (2009), Larsen, Udert und Lienert (2013), Rose et al. (2015), Penn et al. (2018) und Quellen darin

^c basierend auf Friedler, Brown und Butler (1996)

^d typischer Wert (schiffsspezifisch)

^e Schätzwerte

^f höhere Angaben sind vermutlich auf Ausfällungen in gelagertem Urin und/oder Toilettenpapier zurückzuführen

Die Zeiten der Toilettennutzung werden anhand von Wahrscheinlichkeitsverteilungen modelliert. Die dazu getroffenen Annahmen werden im Folgenden für jeden Spülvorgang erläutert.

Urinieren

Das Urinieren erfolgt in der Regel kurz nach dem Aufwachen, in relativ regelmäßigen Abständen während der Wachzeit und mit geringerer Wahrscheinlichkeit in der Nacht (Blanker et al., 2000, Burgio, Engel und Locher, 1991, Friedler, Butler und Brown, 1996, Rauch et al., 2003). Im Modell wird die Gesamtzahl der Harnabgänge pro Person und Tag hinterlegt. Die zeitliche Verteilung des Urinierens über den Tag wird anhand folgender Annahmen modelliert:

- Die Urinmenge pro Harnabgang ist konstant (Gesamtmenge pro Tag geteilt durch Anzahl der Harnabgänge).
- Jeweils ein Harnabgang erfolgt kurz nach dem Aufstehen und kurz vor dem Zubettgehen.
- Ein Harnabgang erfolgt in Verbindung mit der Defäkation (siehe unten).
- Die restliche Urinmenge wird in regelmäßigen Abständen abgegeben. Die Frequenz während der Schlafzeit wird im Modell hinterlegt (Standardwert: 0,1 Harnabgänge/h (Friedler, Brown und Butler, 1996, Parsons et al., 2007, van Haarst et al., 2004)). Die Frequenz während der Wachphasen wird anhand der verbleibenden Anzahl an Harnabgängen und der mittleren Dauer des Wachseins berechnet.

Defäkation

Für die zeitliche Verteilung der Defäkation über den Tag werden folgende Annahmen getroffen (basierend auf Daten aus Friedler, Brown und Butler, 1996, Heaton et al., 1992, Shemerovskii, 2002):

- 50% aller Stuhlgänge finden innerhalb von 0,5 bis 3 Stunden nach dem Aufwachen statt, modelliert über eine PERT-Verteilung mit einem Median von 1 h.
- Die verbleibenden 50% sind gleichmäßig über die Dauer des Wachseins verteilt.
- Während der Schlafenszeit findet keine Defäkation statt.
- Die Defäkation ist immer mit einem Harnabgang verbunden.

Toilettenreinigung

Für die Toilettenreinigung wird angenommen, dass diese während im Modell zu hinterlegenden Zeiten gleichmäßig verteilt stattfindet. Ggf. könnten auch unterschiedliche Intensitäten angesetzt werden (z. B. Reinigung an Wechseltagen schwerpunktmäßig vor Eintreffen der neuen Passagiere).

Die resultierenden Tagesverläufe des Schwarzwasseranfalls, der TN-Fracht und der CSB-Fracht sowie der CSB- und TN-Konzentrationen sind in Bild 29 und Bild 30 im Abschnitt A.2.1 für einen Hafentag, einen Seetag und einen Wechseltag dargestellt.

B.1.3 Kabinengrauwasser

Der Kabinengrauwasseranfall wird über die Modellierung der folgenden Aktivitäten abgebildet: Duschen, Händewaschen, sonstige Körperpflege (Zähneputzen, Rasieren etc.) und Reinigung (Reinigung der Kabinen und anderen Bereiche des Schiffes). Dabei werden jeder Aktivität eine personenspezifische Abwassermenge und eine zeitliche Verteilung über den Tag zugeordnet. Typische Wertebereiche für die Abwassermengen sind in Tabelle 11 angegeben. Die daraus resultierende Gesamtmenge stimmt gut mit den an Bord verschiedener Schiffe ermittelten Daten und sonstigen Angaben zum Kabinengrauwasseranfall überein (vgl. Bild 31).

Tabelle 11 Typische personenspezifische Abwassermengen der dem Kabinengrauwasseranfall zugrundeliegenden Aktivitäten

	$Q_{d,p}$ (L/(Pd))	Quellen
Duschen	50 (12-90)	Styles, Schoenberger und Galvez-Martos (2015), Scheepers und Jacobs (2014), Arregui, Soriano und Cobacho (2013), Blokker et al. (2011), Eriksson et al. (2002) und Quellen darin
Händewaschen	12 (7,5-28)	Styles, Schoenberger und Galvez-Martos (2015), Blokker et al. (2011)
sonstige Körperpflege	10 (4-24)	Styles, Schoenberger und Galvez-Martos (2015), Blokker et al. (2011)
Reinigung	20 (12-47)	Gössling (2001)

Die Abwasserzusammensetzung wird vereinfachend für alle Aktivitäten als gleich und konstant angesetzt. Typische Wertebereiche für die Kabinengrauwasserzusammensetzung finden sich im Abschnitt A.2.2 sowie in Tabelle 2.

Für die zeitliche Verteilung der Aktivitäten über den Tag wurden die im Folgenden dargelegten Annahmen getroffen, die z. T. auf üblichen Verhaltensweisen (z. B. Händewaschen nach der Toilettennutzung)

beruhen und z. T. aus den vorliegenden Daten zum Tagesgang des Kabinengrauwasseranfalls abgeleitet wurden.

Duschen

Die vorliegenden Daten von Bord deuten darauf hin, dass vorrangig nach dem Aufstehen und am Nachmittag nach dem Landgang bzw. vor dem Abendessen geduscht wird (siehe Abschnitt A.2.2 und insbesondere Bild 32). Inwiefern diese Vermutung zutrifft und auf Kreuzfahrten im Allgemeinen übertragbar ist, könnte nur anhand eines größeren und vielfältigeren Datensatzes festgestellt werden. Es ist außerdem zu vermuten, dass die Duschhäufigkeit bzw. der Duschabwasseranfall auch durch weitere Faktoren wie bspw. die Temperatur beeinflusst wird. Daher sind die im Folgenden getroffenen Annahmen als illustratives Beispiel zu betrachten, welches an andere Verhaltensmuster angepasst werden kann. Eine Übersicht der beispielhaften Modellparameter findet sich in Tabelle 12.

Personen, die den gesamten Tag an Bord verbringen:

- Der Anfall des Duschabwassers verteilt sich auf Duschen nach dem Aufstehen, Duschen um die Mittagszeit und Duschen am Nachmittag/frühen Abend.
- Duschen am Morgen finden bis zu 2 Stunden nach dem Aufstehen statt, modelliert über eine PERT-Verteilung mit einem Median von 15 Minuten.
- Für die Duschzeiten am Nachmittag und Abend wird eine unabhängig von den Schlafenszeiten definierte PERT-Verteilung hinterlegt (siehe Tabelle 12).

Personen, die einen Landgang machen:

- Der Anfall des Duschabwassers verteilt sich auf Duschen nach dem Aufstehen und Duschen nach dem Landgang.
- Duschen am Morgen finden bis zu 2 Stunden nach dem Aufstehen statt, modelliert über eine PERT-Verteilung mit einem Median von 15 Minuten.
- Duschen nach dem Landgang finden bis zu 1 Stunde nach Rückkehr statt, modelliert über eine PERT-Verteilung mit einem Median von 30 Minuten.

Personen, die ausschiffen:

- Das gesamte Duschabwasser fällt beim Duschen nach dem Aufstehen an. Duschen am Morgen finden bis zu 2 Stunden nach dem Aufstehen statt, modelliert über eine PERT-Verteilung mit einem Median von 15 Minuten.

Personen, die einschiffen:

- Das gesamte Duschabwasser fällt beim Duschen am Nachmittag bzw. frühen Abend an. Die Duschzeiten werden über eine unabhängig von den Schlafenszeiten definierte PERT-Verteilung festgelegt (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12 Modellparameter für die Verteilung des Duschabwasseranfalls

		Anteil (%)	Min.	Median	Max.	γ
Tag an Bord	nach Aufstehen (zeitliche Differenz)	25	0 h	0,25 h	2 h	4
	Mittag	15	10:00	12:30	16:00	4
	Nachmittag/Abend	60	16:00	18:00	20:00	4
Landgang	nach Aufstehen (zeitliche Differenz)	20	0 h	0,25 h	2 h	4
	nach Rückkehr (zeitliche Differenz)	80	0 h	0,5 h	1 h	4
Ausschiffen	nach Aufstehen (zeitliche Differenz)	40	0 h	0,25 h	2 h	4
Einschiffen	Nachmittag/Abend	15	15:00	18:00	20:00	4

Händewaschen

Für das Händewaschen wird angenommen, dass die Hände nach jedem Toilettengang gewaschen werden. Die Verteilung über den Tag folgt daher der Verteilung für den Schwarzwasseranfall (U- und FU-Spülungen, vgl. Abschnitt B.1.2).

Sonstige Körperpflege

Für die sonstige Körperpflege wird davon ausgegangen, dass diese direkt nach dem Aufwachen sowie direkt vor dem Zubettgehen stattfindet (jeweils 50% des Abwasseranfalls). Entsprechend richtet sich die zeitliche Verteilung über den Tag nach dem Passagier- und Crewmodell (siehe Abschnitt B.1.1).

Reinigung

Für die Reinigung wird angenommen, dass diese zu den gleichen Zeiten und in gleichem Maße wie die Toilettenreinigung (siehe Abschnitt B.1.2) stattfindet.

Bild 38 zeigt beispielhaft den mit dem Zulaufprognosemodell berechneten Verlauf des Kabinengrauwasseranfalls für einen Hafentag, einen Seetag und einen Wechseltag. Die genutzten Modellparameter finden sich in Tabelle 7, Tabelle 8, Tabelle 11 und Tabelle 12.

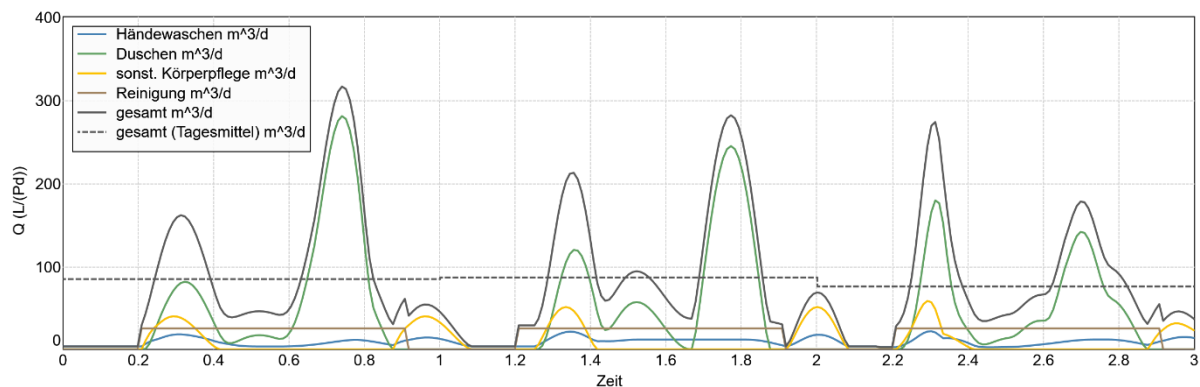


Bild 38 Mit dem Zulaufprognosemodell berechneter Verlauf des Kabinengrauwasseranfalls (Tag 1: Hafentag, Tag 2: Seetag, Tag 3: Wechseltag)

B.1.4 Küchenabwasser

Die Gesamtmenge des anfallenden Küchenabwassers kann über die Anzahl der servierten Mahlzeiten pro Tag abgeschätzt werden. Typische Werte können Abschnitt A.2.3 entnommen werden. Für den Tagesverlauf des Küchenabwasseranfalls wird angenommen, dass ein Teil des Abwassers rund um die Uhr (konstant) und das übrige Abwasser vornehmlich um die Essenszeiten herum anfällt. Die Aufteilung des Abwassers auf die Grundlast und die jeweiligen Spitzen sowie die zeitliche Verteilung der Spitzen wurde aus den vorliegenden Daten (siehe Bild 35) abgeleitet. Dabei wird zwischen Hafen- sowie See- und Wechseltagen unterschieden. Die zeitliche Verteilung der Spitzen wird über modifizierte PERT-Verteilungen dargestellt. Die abgeleiteten Parameter sind in Tabelle 13 zusammengefasst. Aufgrund der relativ beschränkten zugrundeliegenden Datenbasis und schiffspezifisch unterschiedlicher Essenszeiten und -angebote sind die hier gezeigten Daten als illustratives Beispiel zu betrachten, das ggf. fallspezifisch angepasst werden sollte. Bild 39 zeigt den resultierenden Verlauf des Küchenabwasseranfalls für einen Seetag und einen Hafen- bzw. Wechseltag.

Tabelle 13 Modellparameter für den Tagesgang des Küchenabwasseranfalls

		Anteil (%)	Min.	Median	Max.	γ
Seetag	Frühstück	12,5	5:00	9:30	12:00	3,5
	Mittag und Nachmittag	12,5	11:00	14:00	17:00	2
	Abend	25	16:00	21:30	24:00	3
	Grundlast	50	rund um die Uhr, konstant			
Hafentag	Frühstück	12,5	5:00	8:30	11:00	3,5
	Mittag und Nachmittag	2,5	11:00	13:00	16:00	3
	Abend	35	15:00	19:30	23:00	3
	Grundlast	50	rund um die Uhr, konstant			
Wechseltag	Frühstück	12,5	5:00	9:30	12:00	3,5
	Mittag und Nachmittag	12,5	11:00	14:00	17:00	2
	Abend	25	16:00	21:30	24:00	3
	Grundlast	50	rund um die Uhr, konstant			

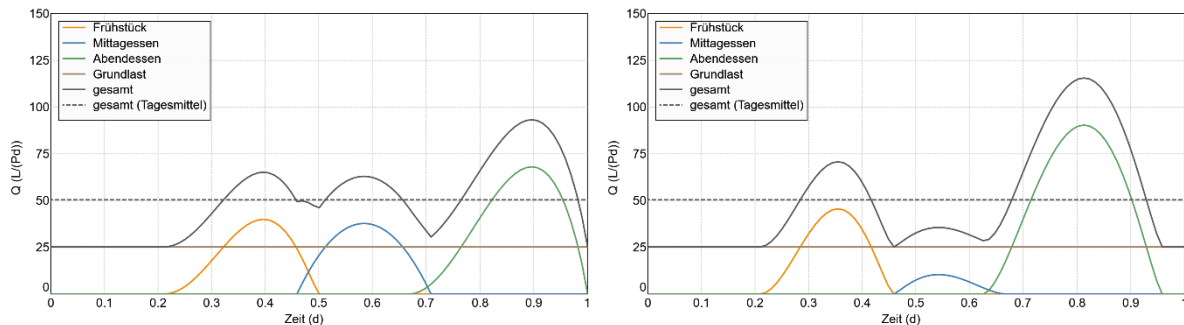


Bild 39 Mit dem Zulaufprognosemodell berechneter Tagesverlauf des Küchenabwasseranfalls; links: Seetag, rechts: Hafen-/Wechseltag

Die Küchenabwasserzusammensetzung wird vereinfachend als konstant angenommen, da keine ausreichende Datengrundlage für spezifischere Annahmen vorhanden ist.

B.1.5 Wäschereiabwasser

Für das Wäschereiabwasser wird ein konstanter Abwasseranfall während der Betriebszeiten der Wäscherei angenommen. Die pro Tag anfallende Abwassermenge pro Person $Q_{d,P,Wäscherei}$ (in L/(Pd)) wird über die personenspezifische Menge an Wäsche $m_{d,P,Wäsche}$ (in kg/d), den Wasserbedarf/Abwasseranfall der Waschmaschinen $Q_{Wäsche}$ (in L/kg Wäsche) und den mittleren Füllgrad der Waschmaschinen $\eta_{Füllgrad}$ (in % der maximalen Füllung/100) abgeschätzt:

$$Q_{d,P,Wäscherei} = \frac{m_{d,P,Wäsche} Q_{Wäsche}}{\eta_{Füllgrad}} \tag{B.1}$$

Typische Werte für $m_{d,P,Wäsche}$ und $Q_{Wäsche}$ können dem Abschnitt A.2.4 entnommen werden und sollten nach Möglichkeit schiffsspezifisch angepasst werden. Der Abwasseranfall $Q_{Wäscherei}$ (in m³/d) während der Betriebszeit der Wäscherei berechnet sich aus:

$$Q_{Wäscherei} = \frac{Q_{d,P,Wäscherei} n_p 24 \text{ h } 1 \text{ m}^3}{t_{Wäscherei} 1 \text{ d } 1000 \text{ L}} \tag{B.2}$$

worin $t_{Wäscherei}$ die tägliche Betriebsdauer der Wäscherei (in h) bezeichnet.

Die Zusammensetzung des Wäschereiabwassers wird als konstant angenommen; typische Werte finden sich in Abschnitt A.2.4.

B.1.6 Abwässer aus der organischen Reststoffbehandlung

Für die Abwässer aus der organischen Reststoffbehandlung (Entwässerung von Speiseresten und Rückständen aus der mechanischen Abwasservorbehandlung, Trocknung) wird angenommen, dass der Abwasseranfall während der Betriebsdauer der jeweiligen Prozesse konstant ist. Der Gesamtabwasseranfall während des Betriebs $Q_{d,Abwasser}$ wird über eine Massen- und Feststoffbilanz abgeschätzt:

$$Q_{d,Abwasser} = m_{d,org. \text{ Reststoff}} \left(1 - \frac{TS_{ein}}{TS_{aus}}\right) \quad (B.3)$$

worin $m_{d,org. \text{ Reststoff}}$ die behandelte Reststoffmenge und TS_{ein} und TS_{aus} den TS vor bzw. nach der Behandlung bezeichnen. Der resultierende Abwasseranfall während der Betriebsdauer $t_{\text{Reststoffbehandlung}}$ berechnet sich nach:

$$Q_{Abwasser} = \frac{Q_{d,Abwasser}}{t_{\text{Reststoffbehandlung}}} \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \quad (B.4)$$

Die Betriebsdauer kann aus der zu behandelnden Reststoffmenge und der Förderkapazität der zur Beschickung genutzten Pumpe bzw. dem möglichen Durchsatz des Reststoffbehandlungsprozesses abgeschätzt werden.

Die Zusammensetzung des Abwassers aus der organischen Reststoffbehandlung wird vereinfachend als konstant angenommen. Anhaltswerte für die jeweiligen Zusammensetzungen können den Abschnitten A.2.5, A.2.6 und A.2.7 entnommen werden.

B.2 Schlamm Bilanzmodell

Das Schlamm Bilanzmodell umfasst die Prozesse des Wachstums und Zerfalls der heterotrophen Mikroorganismen sowie eine Feststoff-Massenbilanz um die biologische Stufe. Dabei wird angenommen, dass der abbaubare CSB im Zulauf komplett umgesetzt wird und das Permeat feststofffrei ist. Die Feststoffe werden unterschieden in inerte Feststoffe $X_{U,TS}$ (sowohl organisch als auch anorganisch) und aktive Biomasse $X_{Bio,TS}$.

Die Änderung der Masse $m_{X_{U,TS,MBR}}$ (in g TS) an $X_{U,TS}$ in der biologischen Stufe innerhalb eines Zeitschrittes Δt (in d) setzt sich zusammen aus den mit dem Zulauf eingetragenen inerten Feststoffen, den

durch den Biomassezerfall entstehenden inerten Feststoffen sowie der Verringerung der inerten Feststoffmasse durch den Überschussschlammabzug und berechnet sich nach

$$\Delta m_{X_{U,TS,MBR}} = \left(Q_{zu} X_{U,TS,zu} + i_{TS_CSB,XU} f_{X_{U,Bio,lys}} b_{OHO} m_{X_{Bio,CSB,MBR,0}} \right) \Delta t - r_{V_{ÜSS}} m_{X_{U,TS,MBR,0}} \quad (B.5)$$

mit

Q_{zu}	mittlerer Zulaufvolumenstrom im Zeitschritt (in m ³ /d)
$X_{U,TS,zu}$	Konzentration inerten Feststoffe im Zulauf (in g TS/m ³)
$i_{TS_CSB,XU}$	Verhältnis von TS zu CSB der Zerfallsprodukte der Biomasse (g TS/g CSB)
$f_{X_{U,Bio,lys}}$	Anfall nicht abbaubarer Zerfallsprodukte (g CSB/g CSB)
b_{OHO}	Sterberate der heterotrophen Organismen (d ⁻¹)
$m_{X_{Bio,CSB,MBR,0}}$	Masse an aktiver Biomasse in der biologischen Stufe zu Beginn des Zeitschrittes (g CSB)
$r_{V_{ÜSS}}$	Anteil des abgezogenen Überschussschlammvolumens am Gesamtvolumen (m ³ /m ³)
$m_{X_{U,TS,MBR,0}}$	Masse an inerten Feststoffen zu Beginn des Zeitschrittes (g CSB).

Für die Änderung der Masse an aktiver Biomasse in der biologischen Stufe (in g TS) werden der Eintrag aktiver Biomasse aus dem Zulauf, der Zuwachs durch das Biomassewachstum und die Verringerung durch den Biomassezerfall sowie den Überschussschlammabzug berücksichtigt:

$$\Delta m_{X_{Bio,TS,MBR}} = \left(Q_{zu} X_{Bio,TS,zu} + \left(Q_{zu} c_{CSB,abb,zu} Y_{OHO} - b_{OHO} m_{X_{Bio,CSB,MBR,0}} \right) i_{TS_CSB,XBio} \right) \Delta t - r_{V_{ÜSS}} m_{X_{Bio,TS,MBR,0}} \quad (B.6)$$

mit

$X_{Bio,TS,zu}$	Konzentration aktiver Biomasse im Zulauf (in g TS/m ³)
$c_{CSB,abb,zu}$	Konzentration an abbaubarem CSB im Zulauf (g CSB/m ³)
Y_{OHO}	Ertragskoeffizient (g CSB/g CSB)
$i_{TS_CSB,XBio}$	Verhältnis von TS zu CSB der aktiven Biomasse (g TS/g CSB).

Die Temperaturabhängigkeit der Sterberate berechnet sich nach

$$b_{OHO} = b_{OHO,20^{\circ}C} e^{-\theta_{OHO}(20^{\circ}C - T)} \quad (B.7)$$

worin $b_{OHO,20^{\circ}C}$ die Sterberate (in d⁻¹) bei einer Temperatur T (in °C) von 20°C und θ_{OHO} den Temperaturabhängigkeitskoeffizienten der Sterberate (einheitenlos) bezeichnet.

Die TS-Konzentration kann aus der Gesamtmasse an TS in der biologischen Stufe und dem Füllvolumen berechnet werden. Neben dem TS wird das dynamische Schlammalter SRT nach Takács et al. (2008) wie folgt berechnet:

$$SRT = SRT_0 + 1 - \frac{SRT_0 r_{TS+}}{m_{X_{Bio,TS,MBR}} + m_{X_{U,TS,MBR}}} \quad (B.8)$$

mit

$$r_{TS+} = \left(Q_{zu} X_{Bio,TS,zu} + Q_{zu} c_{CSB,abb,zu} Y_{OHO} i_{TS_CSB,XBio} + Q_{zu} X_{U,TS,zu} + i_{TS_CSB,XU} f_{X_{U,Bio,lys}} b_{OHO} m_{X_{Bio,CSB,MBR,0}} \right) \Delta t \quad (B.9)$$

SRT_0 Schlammalter des vorherigen Zeitschrittes.

Typische Wertebereiche der Modellparameter sind in Tabelle 14 zusammengestellt.

Tabelle 14 Typische Wertebereiche der Modellparameter des Schlamm Bilanzmodells

Parameter	Einheit	typischer Wertebereich	Quelle
Y_{OHO}^{13}	g CSB/g CSB	0,67 (0,38-0,75)	Hauduc et al. (2011a), Fenu et al. (2010), Jeppsson (1996) und Quellen darin
$b_{OHO,20^{\circ}C}^{14}$	d ⁻¹	0,33 (0,2-0,33)	Alex et al. (2015), Hauduc et al. (2011a), Koch et al. (2000)
θ_{OHO}	-	0,070 (0,069-0,086)	Hauduc et al. (2011a), Koch et al. (2000)
$f_{XU,Bio,Iys}$	-	0,2	Henze et al. (2015), Koch et al. (2000)
$\dot{t}_{S_CSB,XU}$	g TS/g CSB	0,75	Henze et al. (2015)
$\dot{t}_{S_CSB,XBio}$	g TS/g CSB	0,77 (0,75-0,9)	Henze et al. (2015), Contreras et al. (2002)

B.3 Nährstoffeliminationsmodell

Zur Modellierung der Nährstoffelimination wurde das ASM3 (Gujer et al., 1999), das ein bewährtes Modell für biologische Kläranlagen ist, in leicht angepasster Form verwendet. Als Ausgangsmodell diente die in SIMBA# hinterlegte ASM3-Variante asm3h, welche die Parameterwerte aus Alex et al. (2015) und Koch et al. (2000) als Standardwerte nutzt. Die in OSCAR vorgenommenen Anpassungen betreffen die Abbildung der organischen Stickstofffraktion. Im ASM3 wird der Stickstoffgehalt über feste Stickstoffgehalte der CSB-Fractionen (organischer Stickstoff) sowie die Ammonium-Konzentration (Fraktion SNH) festgelegt. Die im asm3h hinterlegten Standardwerte für den Stickstoffgehalt der CSB-Fractionen sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Die CSB- und Stickstoff-Konzentrationen und resultierenden Stickstoffgehalte der Abwasserteilströme an Bord finden sich in Tabelle 16. Für die Anwendung des ASM3 auf Schiffskläranlagen sind daraus zwei Schwierigkeiten ersichtlich:

- Die Verhältnisse von Stickstoff zu CSB sind in den meisten Abwasserteilströmen tendenziell geringer als die ASM-Standardwerte für die maßgeblichen Fraktionen SS und XS¹⁵. Ohne Anpassung der Stickstoffgehalte für die Fraktionen SS und XS wird die Stickstofffracht im Zulauf ggf. überschätzt.
- Das Verhältnis von Stickstoff zu CSB im Schwarzwasser ist variabel und höher als die Standardwerte. Der über den Standardwert hinausgehende Stickstoffgehalt liegt, je nach Hydrolysegrad, nicht unbedingt in Form von Ammonium vor.

¹³ Entspricht dem Modellparameter Y_H des Activated Sludge Model No. 1 (ASM1) Henze et al. (1987).

¹⁴ Entspricht dem Modellparameter b_{H,O_2} des Activated Sludge Model No. 3 (ASM3) Gujer et al. (1999). Ggf. sollte der Wert verringert werden, um die anoxische Zone zu berücksichtigen.

¹⁵ Der inerte gelöste CSB hat nur einen Anteil von wenigen Prozent am Gesamt-CSB. Der inerte partikuläre CSB trägt nicht zur zu nitrifizierenden Stickstofffracht und (aufgrund der Entfernung durch die Membran) auch nicht zu den Stickstoff-Ablaufwerten bei und ist daher von untergeordneter Bedeutung.

Tabelle 15 Standardwerte für den Stickstoffgehalt der CSB-Fractionen im Modell asm3h (nach Koch et al., 2000)

Fraktion	Kürzel	Standardwert Stickstoffgehalt (g N/g CSB)
leicht abbaubarer gelöster CSB	SS	0,03
langsam abbaubarer CSB	XS	0,03
inertes gelöster CSB	SI	0,01
inertes partikulärer CSB	XI	0,04
autotrophe Biomasse	XA	0,07
heterotrophe Biomasse	XH	0,07

Tabelle 16 Typische Stickstoff- und CSB-Konzentrationen sowie resultierendes Verhältnis von N:CSB in Schiffsabwasserteilströmen

Teilstrom	TN (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	CSB (mg/L)	TN:CSB-Verhältnis (g N/g CSB)
Schwarzwasser	440-1.325	90-1200	2.400-11.250	0,07-0,53 ¹
Küchenabwasser	40 (2-126)	0-3,5	2500 (160-3.000)	0,016 (0,01-0,03)
Kabinengrauwasser	8 (2-16)	0-5	325 (75-550)	0,025 (0,01-0,05)
Wäschereiabwasser	8 (2-20)	0-8	360 (75-550)	0,022 (0,01-0,05)
Speiserestpresswasser	4.000 (1.740-7.350)	360-1200	160.000 (144.750-238.660)	0,025 (0,01-0,03)

¹ aus Zulaufprognosemodell

Um die geringeren Stickstoffgehalte abzubilden, können die im Modell hinterlegten Werte für die Stickstoffgehalte der relevanten CSB-Fractionen SS und XS auf das geringste in den Abwasserteilströmen auftretende Verhältnis verringert werden. Zur Anpassung der Stickstoffgehaltes der verbleibenden Teilströme bestehen zwei Möglichkeiten:

- Anpassung des Stickstoffgehaltes über die SNH-Konzentration des Teilstroms
- Definition einer zusätzlichen Modell-Fraktion für organischen Stickstoff sowie eines Prozesses für die Hydrolyse dieser Fraktion (Stöchiometrie und Kinetik)

Variante a) ist einfacher umzusetzen. Liegt der Stickstoff jedoch in Wirklichkeit nicht in Form von Ammonium vor, hat diese Variante den Nachteil, dass die im Modell berechneten SNH-Konzentrationen nicht direkt mit NH₄-Messwerten (zumindest im Zulauf und in der Deni-Zone) abgeglichen werden können. Zudem ist dieser Ansatz nur anwendbar, wenn die Hydrolyse schnell genug abläuft, um im Modell vernachlässigt werden zu können. Variante b) hat diese Nachteile nicht, erfordert aber die Bestimmung bzw. Abschätzung der Hydrolyse-Kinetik und des Hydrolysegrades des Stickstoffes in den einzelnen Teilströmen.

Der im Schiffsabwasser enthaltene Stickstoff stammt zu ca. 75-90% aus dem Schwarzwasser und liegt daher größtenteils in Form von Harnstoff (Urea) oder Ammonium vor. In beiden Fällen handelt es sich um gelöste Stoffe, die nicht zum CSB beitragen. In OSCAR wurden Versuche zur Bestimmung der Harnstoffhydrolyserate von Belebtschlamm durchgeführt (siehe Abschnitt C.1). Die Harnstoffhydrolyse folgt i. d. R. einer Michaelis-Menten-Kinetik (Moblely, Island und Hausinger, 1995). Da vielfältige Mikro-

organismen zur Harnstoffhydrolyse fähig sind (Mobley, Island und Hausinger, 1995), wird hier angenommen, dass die Hydrolyserate von der Gesamtkonzentration an Biomasse (autotrophe und heterotrophe Organismen) abhängig ist:

$$r_{\text{Ureahydrolyse}} = \frac{r_{\text{Ureahydrolyse,max}} c_{\text{Urea}}}{K_{\text{Urea}} + c_{\text{Urea}}} (XA + XH) i_{\text{TS,oTS,Biomasse}} i_{\text{oTS_CSB,Biomasse}} \quad (\text{B.10})$$

mit

$r_{\text{Ureahydrolyse}}$	Harnstoffhydrolyserate (in g Urea-N/(m ³ d))
$r_{\text{Ureahydrolyse,max}}$	maximale Harnstoffhydrolyserate (in g Urea-N/(g TS _{Biomasse} d))
c_{Urea}	Harnstoffkonzentration (in g/m ³)
K_{Urea}	Halbsättigungskonstante (in g/m ³)
XA	Konzentration autotropher Biomasse (in g CSB/m ³)
XH	Konzentration heterotropher Biomasse (in g CSB/m ³)
$i_{\text{TS,oTS,Biomasse}}$	Verhältnis von TS zu organischer Trockensubstanz (oTS) der Biomasse (Standardwert asm3h: 1/0,92 g TS/g oTS)
$i_{\text{oTS_CSB,Biomasse}}$	Verhältnis von oTS zu CSB der Biomasse (Standardwert asm3h: 1/1,42 g TS/g oTS)

Aus den Versuchen wurden folgende Werte als erste Anhaltspunkte für die kinetischen Parameter der Harnstoffhydrolyse gewonnen (vgl. Bild 41): $r_{\text{Ureahydrolyse,max}} \approx 0,9$ g Urea-N/(g TS_{Biomasse} d) und $K_{\text{Urea}} \approx 10$ g Urea-N/m³. Inwiefern diese Werte auf andere Belebtschlämme übertragbar sind, müsste in weiteren Untersuchungen überprüft werden.

Die durchgeführten Simulationsrechnungen sowie die Ergebnisse aus den Versuchen (vgl. Abschnitt C.1.3) deuten darauf hin, dass die Harnstoffhydrolyse unter normalen Betriebsbedingungen keinen wesentlichen Einfluss auf die Stickstoffelimination hat. Je nach Hydrolysegrad können die Stickstoffkonzentrationen im Zulauf und in der Deni-Zone jedoch erheblich höher als die Ammonium-Konzentrationen sein. Dies sollte bei der Betrachtung gemessener Ammonium-Konzentrationen (die einfacher zu messen sind als die TN-Konzentration) bedacht werden, da es sonst bspw. zu einer Unterschätzung der Stickstoff-Zulaufmenge kommen kann.

Anhang C Versuchstechnik

Die Entwicklung und Erprobung der Konzepte für die modellbasierte Betriebsunterstützung sowie der Cloudlösungen erfolgten an einer Laborkläranlage sowie einer im Technikum des ISAH betriebenen Schiffskläranlage. In den folgenden Abschnitten C.1 und C.2 sind beide Anlagen sowie die daran durchgeführten Untersuchungen beschrieben.

C.1 Versuche zur Harnstoffhydrolyse in der Laborkläranlage

Ziel der Versuche in der Laborkläranlage war zu untersuchen, inwiefern der Hydrolysegrad des Harnstoffs (Hauptbestandteil des organischen Stickstoffs im Schiffsabwasser) die Stickstoffelimination in der biologischen Stufe beeinflusst (vgl. Abschnitt A.2.1).

Zudem wurde der vom Projektpartner SEGNO entwickelte IoT-Connector inkl. Anbindung an die Siemens Mindsphere zunächst an der Laborkläranlage getestet.

C.1.1 Anlagenbeschreibung

Bild 40 zeigt ein Foto sowie das Fließbild eines Reaktors der Laborkläranlage. Das Reaktorvolumen beträgt 20 L. Die an der Laborkläranlage vorhandene Messtechnik ist in Tabelle 17 aufgeführt. Die Daten wurden minütlich aufgezeichnet (ergänzt um Aufzeichnung in der Siemens Mindsphere alle 30 s während einiger Versuche).

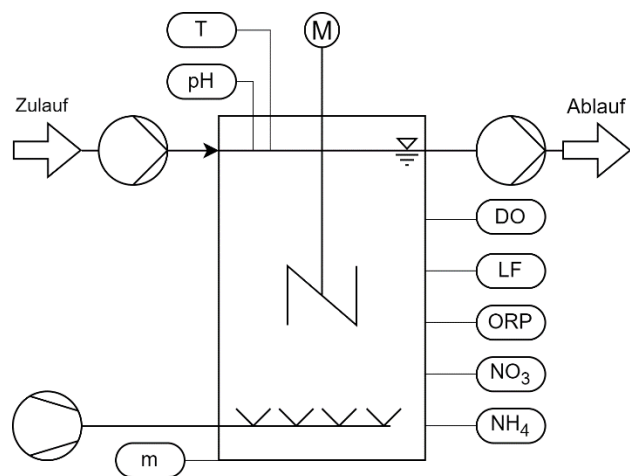


Bild 40 Foto und Fließbild eines Reaktors der Laborkläranlage (Erläuterung der Messgrößen siehe Tabelle 17)

Tabelle 17 Messtechnische Ausstattung der Laborkläranlage

Messstelle	Parameter	Kürzel	Sondentyp
Vorlagebehälter	Füllstand	h	Endress+Hauser Prosonic T FMU30
Reaktor	Gelöstsauerstoff	DO	Hamilton VisiWater DO
	Ammonium	NH ₄	Hach Sension+ ISE Ammonium
	Nitrat	NO ₃	Hach Sension+ ISE Nitrat
	Redoxpotenzial	ORP	Meinsberg EMC173
	pH	pH	Meinsberg EGA173
	Leitfähigkeit	LF	Meinsberg LTC0,35/23
	Temperatur	T	Temperaturfühler
	Gewicht (Füllstand)	m	LAUMAS Elettronica AM Single-point load cell
	Luftvolumenstrom	Q _{Luft}	Bronkhorst

C.1.2 Durchgeführte Versuche

Die Versuche zur Harnstoffhydrolyse wurden mit Belebtschlamm aus der im ISAH-Technikum betriebenen Schiffskläranlage (siehe Abschnitt C.2) durchgeführt, welcher mit Permeat auf die gewünschte Feststoffkonzentration verdünnt wurde. Zum Zeitpunkt der Versuche wurde die Stickstoffkonzentration im Zulauf der Schiffskläranlage mit Ammoniumhydrogencarbonat erhöht, sodass der Belebtschlamm nicht an Harnstoff als Hauptstickstoffquelle gewöhnt war.

Zur Bestimmung der Harnstoffhydrolyserate wurde der Belebtschlamm mit Allylthioharnstoff zur Hemmung der Nitrifikation sowie einer Harnstofflösung versetzt und der Anstieg der Ammoniumkonzentration gemessen (Online-Sonde sowie Küvettentests, Hach, nach ISO 7150-1).

Zudem wurde ein Reaktor der Laborkläranlage über 8 Tage als Sequencing-Batch-Reaktor betrieben (Versuch Juli 2022), um zusätzliche Daten zu Harnstoffhydrolyse- und Nitrifikationsraten zu gewinnen. Als Substrat diente in diesem Versuch synthetisches Schiffsabwasser, das im Rahmen von OSCAR entwickelt wurde. Die Entwicklung des synthetischen Schiffsabwassers erfolgte z. T. im Rahmen einer vom ISAH betreuten Masterarbeit (Kartes, 2020). Das ursprüngliche Abwasserrezept wurde im weiteren Projektverlauf angepasst, um ein feststoff- und fettarmes Abwasser zu erhalten, welches in dem hier beschriebenen Versuch genutzt wurde. Die Abwasserrezepte sind in Tabelle 18 aufgeführt. Die Anteile an Harnstoff und Ammoniumhydrogencarbonat wurden unter Beibehaltung des resultierenden Stickstoffgehaltes variiert (jeweils 100% bzw. 50% Harnstoff und/oder Ammoniumhydrogencarbonat). Zur Bestimmung der Harnstoffhydrolyserate wurde der Anstieg der Ammoniumkonzentration nach Zugabe des Abwassers in der einstündigen unbelüfteten Phase ausgewertet. Ergänzend wurde an mehreren Tagen ein Teil des Belebtschlammes (200 mL) entnommen und wie oben beschrieben mit Allylthioharnstoff zur Hemmung der Nitrifikation sowie einer Harnstofflösung versetzt, um Hydrolyseraten bei höheren Harnstoffkonzentrationen zu bestimmen.

Alle Versuche wurden bei Raumtemperatur (ca. 20°C) durchgeführt.

Tabelle 18 Rezepte für synthetisches Schiffsabwasser

Synthetisches Schwarzwasser (Kartes, 2020)	
Synthetischer Urin nach Colón, Forbis-Stokes und Deshusses (2015) (Stage 4), ohne Kreatinin	116,7 mL
Synthetische Fäzes nach Penn et al. (2018)	27,83 g
Natriumcarbonat	4,8 g
Leitungswasser	800 mL
Synthetisches Küchenabwasser (Kartes, 2020)	
Hundefutter (püriert)	9 g
Geschirrspülpulver	0,05 g
Rotwein	3 mL
Leitungswasser	500 mL
Synthetisches Mischabwasser, fett- und feststoffarm	
Harnstoff	37,5 mg/L
Ammoniumhydrogencarbonat	170,3 mg/L
Tri-Ammoniumcitrat	16,3 mg/L
Kaliumchlorid	23,3 mg/L
Magnesiumsulfat Heptahydrat	3,3 mg/L
Calciumchlorid Dihydrat	5,6 mg/L
Kaliumdihydrogenphosphat	14,3 mg/L
Kaliumhydrogensulfat	4,1 mg/L
Natriumchlorid	75,0 mg/L
Kaliumhydrogencarbonat	4,1 mg/L
Miso-Paste	147 mg/L
Hefeextrakt	49 mg/L
Proteinpulver	105 mg/L
Wein	2,1 mL/L
Malzextrakt	175 mg/L
Geschirrspülpulver	35 mg/L

C.1.3 Ergebnisse zur Harnstoffhydrolyse

Die ermittelten Harnstoffhydrolyseraten sind in Bild 41 in Abhängigkeit der Harnstoffkonzentration dargestellt. Bild 41 links zeigt die Harnstoffhydrolyserate bezogen auf die organische Trockensubstanz (oTS). Hier ist auffällig, dass der Versuch im Mai 2022 deutlich geringere Hydrolyseraten aufweist. Über das Schlamm Bilanzmodell (siehe Abschnitt B.2 und Abschnitt 3.4) wurde der Anteil aktiver Biomasse am Belebtschlamm abgeschätzt. Dieser war im Mai 2022 mit ca. 11% geringer als im Juli 2022 mit ca. 20%. Die in Bild 41 rechts dargestellte Hydrolyserate ist auf die aus dem Anteil aktiver Biomasse berechnete Biomassekonzentration (in g TS) bezogen, was zu einer besseren Übereinstimmung zwischen den zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführten Versuchen führt und die These stützt, dass die Hydrolyserate von der Biomassekonzentration abhängt (vgl. Abschnitt B.3).

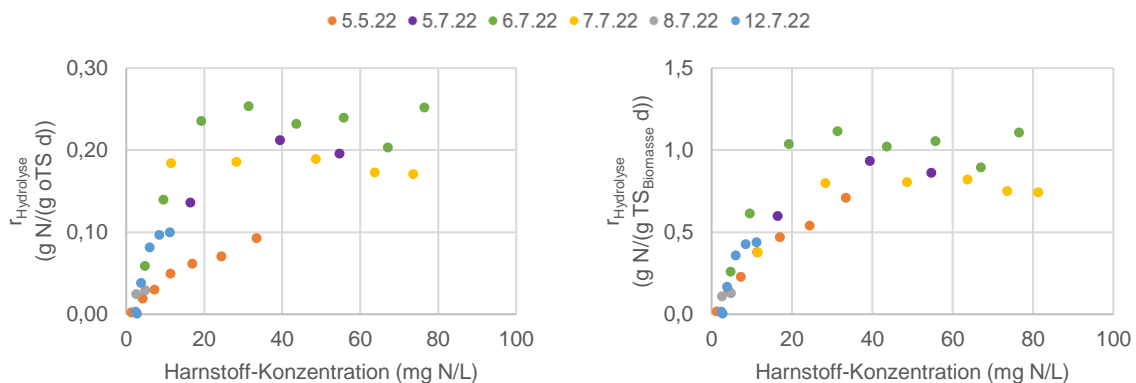


Bild 41 Gemessene Harnstoffhydrolyseraten in Abhängigkeit der Harnstoffkonzentration (links: bezogen auf oTS, rechts: bezogen auf g TS_{Biomasse})

C.2 Erprobung an der Versuchsschiffskläranlage

Zur Erprobung der entwickelten Konzepte für die modellbasierte Betriebsunterstützung und der Cloud-Lösungen wurde eine Schiffskläranlage (Modell CS-MBR, RWO GmbH) angemietet und über einen Zeitraum von rund 14 Monaten im Technikum des ISAH auf der kommunalen Kläranlage Hannover-Herrnhäuser betrieben.

C.2.1 Anlagenbeschreibung

Bild 42 und Bild 43 zeigen Fotos der Versuchsanlage und der zur Beschickung genutzten Abwasser-misch- und -dosierstation. Das Fließschema inkl. verbauter Online-Messtechnik ist in Bild 44 dargestellt.



Bild 42 Foto der Versuchsschiffskläranlage im Technikum des ISAH (links: Denitank, rechts: MBR-Tank, im Hintergrund: Siebrechen)



Bild 43 Fotos der zur Beschickung der Schiffskläranlage genutzten Abwassermisch- und Dosierstation

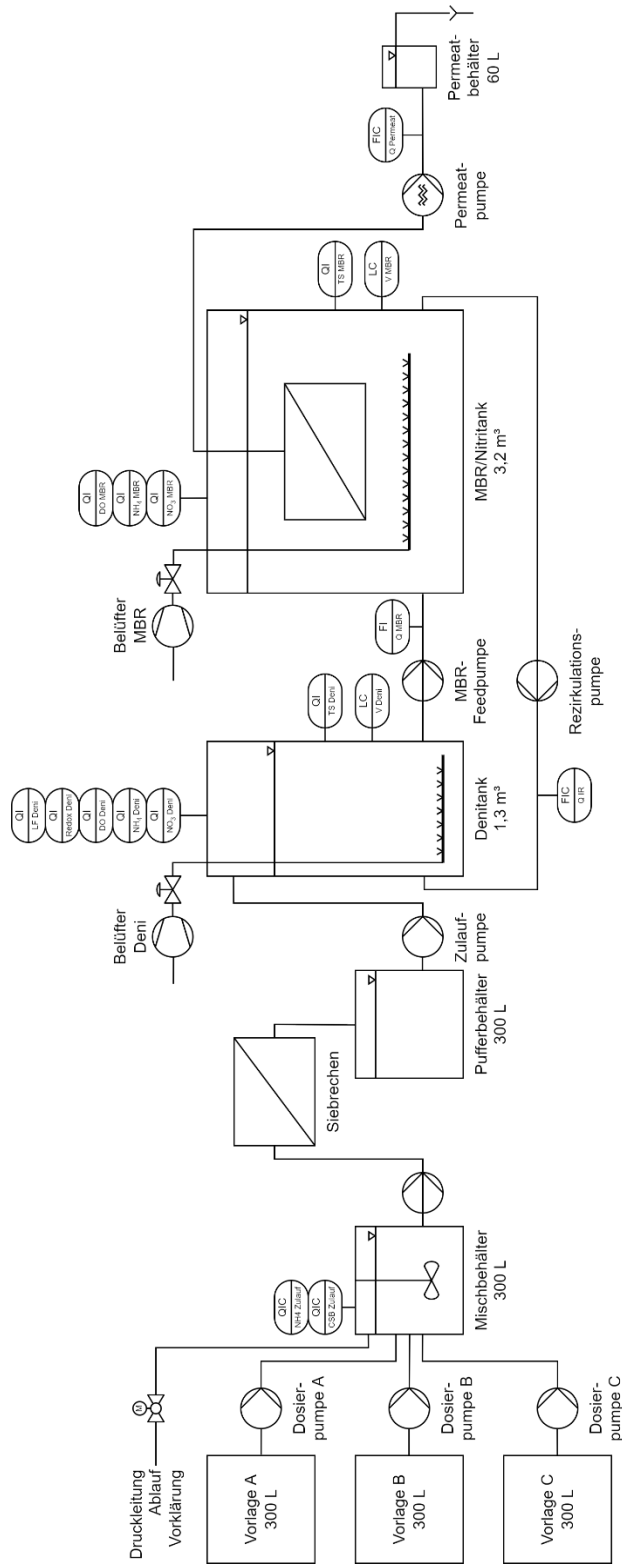


Bild 44 Fließschema der Versuchsschiffskläranlage und der Abwassermisch- und -dosierstation

C.2.1.1 Schiffskläranlage

Die Schiffskläranlage arbeitet nach dem Prinzip der vorgeschalteten Denitrifikation. Zur Abtrennung der Feststoffe dient eine getauchte Flachmembran (Ultrafiltrationsmembran, Membranfläche 20 m²). Die in der Versuchsanlage erfassten Messwerte sind in Tabelle 19 aufgeführt. Die Messwerte wurden i. d. R. minütlich aufgezeichnet. Die mit dem Membranbetrieb in Zusammenhang stehenden Werte (Permeatvolumenstrom, Transmembrandruck) wurden in 5 s-Intervallen gespeichert.

Tabelle 19 In der Versuchsschiffskläranlage verbaute Online-Messtechnik und erfasste Messwerte

Messstelle	Sondentyp	Parameter
Zulaufmischbehälter	GO Systemelektronik in-situ Spektralanalysator	CSB gesamt, CSB gelöst
	Hach A-ISE	Ammonium, Temperatur
Denitank	Drucktransmitter	Füllstand
	Hach AN-ISE	Ammonium, Nitrat, Temperatur
	Hach LDO	Gelöstsauerstoff, Temperatur
	Hach Solitax	Feststoffkonzentration
	Hach 1200-S sc	Redoxpotenzial, Temperatur
	Hach 3798-S sc	Leitfähigkeit, Temperatur
MBR-Tank	Drucktransmitter	Füllstand
	Hach AN-ISE	Ammonium, Nitrat, Temperatur
	Hach LDO	Gelöstsauerstoff, Temperatur
	Hach Solitax	Feststoffkonzentration
MBR-Zulaufstrom	Magnetinduktiver Durchflussmesser	Durchfluss
Interne Rezirkulation	Magnetinduktiver Durchflussmesser	Durchfluss
Permeatstrom	Magnetinduktiver Durchflussmesser	Durchfluss
Membran	Drucktransmitter	Transmembrandruck

C.2.1.2 Abwassermisch- und -dosierstation

Die Beschickung der Schiffskläranlage erfolgte mit Abwasser der kommunalen Kläranlage Hannover-Herrenhausen. Um für Kreuzfahrtschiffe typische Abwasserzusammensetzungen und dynamische Frachtverläufe nachzubilden wurde das kommunale Abwasser mit verschiedenen Zusatzstoffen zur Erhöhung der CSB- und Nährstoffkonzentration versetzt. Um eine automatisierte Anmischung des Zulaufs und Beschickung der Schiffskläranlage zu ermöglichen, wurde durch das ISAH eine Abwassermisch- und -dosierstation (Foto in Bild 43) gebaut und programmiert, die über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) geregelt wird. Zur kontinuierlichen Bereitstellung des kommunalen Abwassers wurde zudem eine Abwasserleitung vom Ablaufschacht des Vorklärbeckens ins Technikum gelegt.

Die Abwassermisch- und -dosierstation ermöglicht die Konzentrationen von Gesamt-CSB sowie NH₄-N bzw. TN im Zulauf zur Versuchsanlage auf vorgegebene Werte einzustellen, indem bis zu drei verschiedene (flüssige) Zusatzstoffe zudosiert werden. Im Rahmen von OSCAR wurden dazu folgende Substrate zugesetzt:

- Restbier zur Erhöhung der CSB-Konzentration
- Bierwasser¹⁶ zur Erhöhung der CSB-Konzentration
- Ammoniumhydrogencarbonat- oder Harnstofflösung zur Erhöhung der Stickstoffkonzentration

Der gewünschte Konzentrationsverlauf wurde dabei in 24 Schritten vorgegeben (entsprechend je nach Beschickung ca. stündlichen Werten). Die Anmischung erfolgte in Chargen von je ca. 200 L, wobei die

¹⁶ bei der Entalkoholisierung von Bier anfallender Reststoff

zuzudosierenden Mengen anhand aktueller Online-Messwerte (Ammonium und CSB) für jeden Ansatz berechnet wurden. Bild 45 zeigt einen Screenshot der Benutzeroberfläche der Abwassermisch- und -dosierstation.

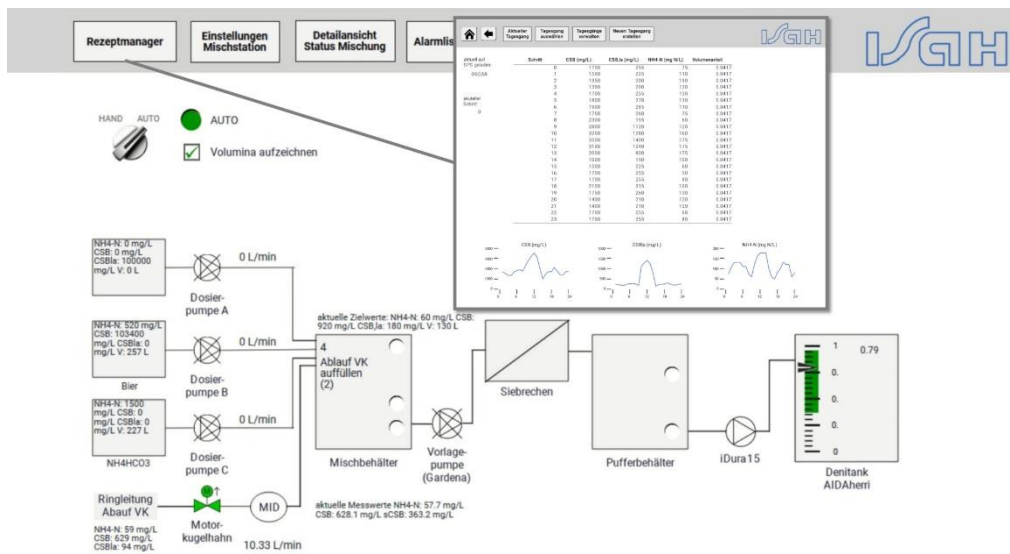


Bild 45 Screenshot der Benutzeroberfläche der am ISAH programmierten Steuerung der Abwassermisch- und -dosierstation

Zum Schutz der Membran vor groben Feststoffen wurde der Zulauf mit einem Siebrechen (NRW Anlagentechnik GmbH, Siebweite 1,5 mm) vorbehandelt.

C.2.2 Begleitanalytik

Die in Abschnitt C.2.1 beschriebenen Online-Messungen werden durch ein wöchentliches Analyseprogramm ergänzt, um die Messwerte der Sonden abzugleichen und nicht durch die Sensorik erfasste Werte aufzunehmen. Dabei wurden die in Tabelle 20 aufgeführten Parameter bestimmt.

Tabelle 20 Im Rahmen der wöchentlichen Zusatzanalytik bestimmte Parameter (Labormessungen)

Parameter	Kürzel	Einheit	Messmethode	Zulauf	Denitank	MBR-Tank	Permeat
CSB gesamt	CSB	mg/L	Küvettenests (Hach) ISO 6060-1989	●			●
CSB papierfiltriert	CSB	mg/L	Küvettenests (Hach) ISO 6060-1989		●	●	
CSB filtriert (0,45 µm)	sCSB	mg/L	Küvettenests (Hach) ISO 6060-1989	●			
Gesamtstickstoff	TN	mg/L	Küvettenests (Hach) EN ISO 11905-1	●			
Ammonium-Stickstoff	NH ₄ -N	mg/L	Küvettenests (Hach) ISO 7150-1, Ionenchromatographie	●	●	●	●
Nitrat-Stickstoff	NO ₃ -N	mg/L	Küvettenests (Hach) ISO 23696-1, Ionenchromatographie		●		●
Gesamtphosphor	TP	mg/L	Küvettenests (Hach) ISO 6878:2004-09	●			●
Phosphat-Phosphor	PO ₄ -P	mg/L	Küvettenests (Hach) ISO 6878:2004-09, Ionenchromatographie	●	●	●	●
Feststoffkonzentration	TS	g/L	Papierfilter DIN 38409-H2-1		●	●	
organischer Feststoffanteil	oTS	%	DIN 38409-H2-1		●	●	
Filtrierbarkeit	-	mL/5 min	Filtertest nach Kubota (Nurishi, Izuimi und Kariya, 1998 in Thiemig, 2011)			●	
pH-Wert	pH	-	WTW pH 3310 mit Sonde SenTix 41	●	●	●	●
Leitfähigkeit	LF	µS/cm	WTW InoLab Cond 7110 mit Sonde Tetra-Con 325	●	●	●	●
Säurekapazität	Ks _{4,3}	mmol/L	Küvettenests (Hach)	●	●	●	●
Trübung		FNU	Hach 2100P				●

C.2.3 Anlagenbetrieb

Die Anlage wurde mit Belebtschlamm aus der kommunalen Kläranlage Hannover-Herrenhausen angeimpft (TS ca. 4 g/L). Während der Einfahrphase (Ende Oktober 2021 bis Mitte Februar 2022) erfolgte die Beschickung zunächst mit Abwasser der Kläranlage Hannover-Herrenhausen. Mit Inbetriebnahme der Abwassermisch- und -dosierstation (siehe Abschnitt C.2.1.2) im Februar 2022 wurde die Zulaufbelastung in 2 Schritten erhöht, sodass ab Ende März 2022 überwiegend schiffsähnliche Zulaufbedingungen erreicht wurden.

Um zu prüfen, inwiefern sich der Hydrolysegrad des Stickstoffs im Zulauf auf den Anlagenbetrieb auswirkt, erfolgte die Aufstockung des Stickstoffgehaltes des Zulaufs zunächst mit Ammoniumhydrogencarbonat (Hydrolyseprodukt von Harnstoff) und wurde ab August 2022 auf Harnstoff umgestellt. Dabei konnten keine Auswirkungen auf die Nitrifikation und die Stickstoffablaufwerte (NH₄-N, TN) festgestellt werden. Mittels der ionenselektiven Ammonium-Sonden kann jedoch nur Ammonium, nicht aber Harnstoff (oder sonstiger organischer Stickstoff) gemessen werden, sodass die Form des Stickstoffs sich auf die messtechnische Erfassung (vor allem) im Zulauf auswirkt.

Anhang D IoT-Infrastruktur

Bild 46 zeigt eine schematische Übersicht der an der Schiffskläranlage im Technikum des ISAH implementierten und erprobten IoT-Infrastruktur.

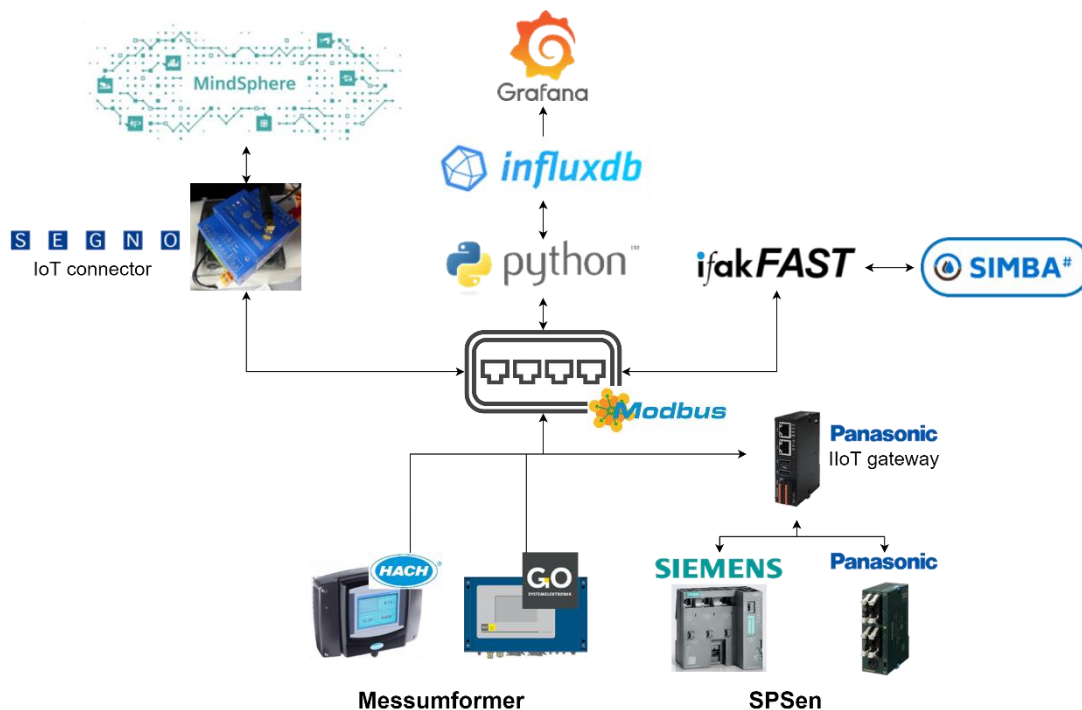


Bild 46 Schematische Übersicht der an der Versuchsschiffskläranlage implementierten IoT-Infrastruktur

Zur Zusammenführung, Speicherung, Bereitstellung und Weiterverarbeitung der Daten aus der Schiffskläranlage wurden folgende Software- und Cloudlösungen erprobt:

- Siemens Mindsphere (jetzt Insights Hub¹⁷): Die Mindsphere ist eine Cloud-Plattform für die Speicherung, Bereitstellung, Weiterverarbeitung und Anzeige von Daten (ausführlichere Informationen können dem Abschlussbericht von SEGNO entnommen werden).
- influxdb¹⁸ mit Grafana¹⁹: influxdb ist eine Open-Source-Zeitreihendatenbank, für die Grafana als Frontend zur Datenanzeige und zur Erstellung automatisierter Benachrichtigungen/Alarmer usw. genutzt wurde. Beide Programme können auf einem eigenen Server betrieben werden (hier: lokaler PC). Zusätzlich ist auch eine kommerzielle Cloudlösung verfügbar.
- ifakFAST²⁰ mit SIMBA#²¹: Die Open-Source-Plattform ifakFAST ermöglicht ebenfalls die Datenspeicherung, -weiterverarbeitung und -anzeige. Eine Besonderheit ist die Schnittstelle zur nahtlosen Echtzeit-Einbettung von SIMBA#-Simulationsmodellen.

Die Anbindung der Anlage an die Siemens Mindsphere erfolgte über den vom Projektpartner SEGNO entwickelten IoT-Connector, der die Daten sammelt, lokal zwischenspeichert und in die Cloud überträgt. Auch das Schreiben von Sollwerten über die Cloud zurück in die Anlagensteuerung ist über den IoT-Connector möglich. Weitere Informationen dazu finden sich im Abschlussbericht von SEGNO.

¹⁷ <https://plm.sw.siemens.com/de-DE/insights-hub/>

¹⁸ <https://www.influxdata.com/>

¹⁹ <https://grafana.com/>

²⁰ <https://fast.ifak.eu/>

²¹ <https://www.ifak.eu/de/produkte/simba>

influxdb, Grafana und ifakFAST wurden auf einem lokal installierten PC betrieben. Die Einspeisung der Daten in influxdb erfolgte über ein selbst programmiertes Python-Programm. Die Software ifakFAST-Mediator bietet Schnittstellen für verschiedene Kommunikationsprotokolle (hier: Modbus TCP) zum Lesen und Schreiben von Daten. Für die Nutzung in OSCAR wurde die Modbus TCP-Schnittstelle des ifakFAST-Mediators durch das ISAH erweitert, um Haltereister sowie Gleitkommazahlen mit unterschiedlichen Byte-Reihenfolgen (Word Order) lesen zu können. Diese Erweiterung wurde in die offizielle Version der Software²² aufgenommen und steht damit frei zur Verfügung. Alternativ können SIMBA#-Modelle über die SIMBA-http-API in (eigene) Software eingebettet werden.

Die verschiedenen zur Schiffskläranlage und zur Abwassermisch- und -dosierstation gehörigen Geräte (SPSen Siemens SIMATIC ET200S und Panasonic FP0R sowie Messumformer Hach SC1000 und GO Systemelektronik BlueBox) wurden über ein Modbus-TCP-Netzwerk mit dem IoT-Connector und dem PC verbunden. Die Kommunikation der SPSen erfolgte dabei über das Panasonic IoT-Gateway FP-I4C.

²² verfügbar unter <http://fast.ifak.eu/> bzw. <https://github.com/ifakFAST>

Literaturverzeichnis

Alaska Cruise Ship Initiative (ACSI), 2000. *Part I Final Report. Wastewater and Solid Waste Handling, Air Emissions, Oil Spills, Environmental Leadership.*

Alaska Department of Environmental Conservation (ADEC), 2012. *Cruise Ship Wastewater Science Advisory Panel. Preliminary Report.* Verfügbar unter: <https://dec.alaska.gov/water/cruise-ships/science-panel/2013-preliminary-report/>

ALEX, J., M. AHNERT, D.J. DÜRRENMATT, G. LANGERGRABER, I. HOBUS, S. SCHMUCK und V. SPERING, 2015. Voraussetzungen für eine dynamische Simulation als Bestandteil einer Kläranlagenbemessung nach DWA-A 131. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, **62**(5), 436-446. Korrespondenz Abwasser, Abfall. Verfügbar unter: doi:10.3242/kae2015.05.003

ALEX, J., U. JUMAR und R. TSCHEPETZKI, 1999. An empirical observer for wastewater treatment plants. In: *1999 European Control Conference (ECC): IEEE / Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated*, S. 2148-2153. ISBN 978-3-9524173-5-5.

ALMEIDA, M., D. BUTLER und E. FRIEDLER, 1999. At-source domestic wastewater quality. *Urban Water*, **1**(1), 49-55. ISSN 1462-0758. Verfügbar unter: doi:10.1016/S1462-0758(99)00008-4

ARREGUI, F.J., J. SORIANO und R. COBACHO, 2013. Discussion of "Simulating Nonresidential Water Demand with a Stochastic End-Use Model" by E. J. M. Blokker, E. J. Pieterse-Quirijns, J. H. G. Vreeburg, and J. C. van Dijk. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **139**(3), 345-346. ISSN 0733-9496. Verfügbar unter: doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000277

AVELLANEDA, P.M., J.D. ENGLEHARDT, J. OLASCOAGA, E.A. BABCOCK, L. BRAND, D. LIRMAN, W.F. ROGGE, H. SOLO-GABRIELE und G. TCHOBANOGLIOUS, 2011. Relative risk assessment of cruise ships biosolids disposal alternatives. *Marine Pollution Bulletin*, **62**(10), 2157-2169. ISSN 0025-326X. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.marpolbul.2011.07.006

BACHON, U., 1993. Wiederverwertung von Fetten aus dem Abwasser von Küchenbetrieben und aus der Fleischverarbeitung. *Fett Wissenschaft Technologie/Fat Science Technology*, **95**(S1), 505-509. ISSN 09315985. Verfügbar unter: doi:10.1002/lipi.19930951307

BACHON, U., 1994. Fortschritte bei der Wiederverwertung von Fetten aus dem Abwasser von Küchenbetrieben und aus der Fleischverarbeitung. *Fett Wissenschaft Technologie/Fat Science Technology*, **96**(S2), 530-535. ISSN 09315985. Verfügbar unter: doi:10.1002/lipi.19940961404

BEHERA, S.K., J.M. PARK, K.H. KIM und H.-S. PARK, 2010. Methane production from food waste leachate in laboratory-scale simulated landfill. *Waste management (New York, N.Y.)*, **30**(8-9), 1502-1508. Waste management (New York, N.Y.). Verfügbar unter: doi:10.1016/j.wasman.2010.02.028

BENTLEY, A. und I. BALLARD, 2007. *Black & grey water treatment solutions using membrane bioreactors.* Verfügbar unter: <http://www.dieselduck.info/machine/04%20auxiliary/2007%20MBR.pdf>

BG Verkehr, Dienststelle Schiffssicherheit (BG VERKEHR), 2014. *D.16 Anforderungen. Bauliche Maßnahmen auf Seeschiffen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Öl, Abwasser, Müll und Abgasemission.* Hamburg.

- BISINELLA DE FARIA, A.B., M. BESSON, A. AHMADI, K.M. UDERT und M. SPÉRANDIO, 2020. Dynamic Influent Generator for Alternative Wastewater Management with Urine Source Separation. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, **6**(2), 4020001. ISSN 2379-6111. Verfügbar unter: doi:10.1061/JSWBAY.0000904
- BLANKER, M.H., A.M. BOHNEN, F.P. GROENEVELD, R.M. BERNSEN, A.D. PRINS und J. RUUD BOSCH, 2000. Normal voiding patterns and determinants of increased diurnal and nocturnal voiding frequency in elderly men. *The Journal of urology*, **164**(4), 1201-1205. ISSN 0022-5347. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0022-5347(05)67141-8
- BLOKKER, E.J.M., E.J. PIETERSE-QUIRIJNS, J.H.G. VREEBURG und J.C. VAN DIJK, 2011. Simulating Nonresidential Water Demand with a Stochastic End-Use Model. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **137**(6), 511-520. ISSN 0733-9496. Verfügbar unter: doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000146
- BOHDANOWICZ, P. und I. MARTINAC, 2007. Determinants and benchmarking of resource consumption in hotels—Case study of Hilton International and Scandic in Europe. *Energy and Buildings*, **39**(1), 82-95. ISSN 03787788. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.enbuild.2006.05.005
- British Water, 2013. *Flows and Loads - 4. Sizing Criteria, Treatment Capacity for Sewage Treatment Systems*. London. BW COP: 18.11/14. Verfügbar unter: https://cdn.ymaws.com/www.britishwater.co.uk/resource/resmgr/publications/codes_of_practice/flows_and_loads___bw_cop_18.pdf
- BURGIO, K.L., B.T. ENGEL und J.L. LOCHER, 1991. Normative Patterns of Diurnal Urination Across 6 Age Decades. *The Journal of urology*, **145**(4), 728-731. ISSN 0022-5347. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0022-5347(17)38436-7
- BURY, S.J., C.K. GROOT, C. HUTH und N. HARDT, 2002. Dynamic simulation of chemical industry wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, **45**(4-5), 355-363. ISSN 0273-1223. Verfügbar unter: doi:10.2166/wst.2002.0623
- BUTT, N., 2007. The impact of cruise ship generated waste on home ports and ports of call: A study of Southampton. *Marine Policy*, **31**(5), 591-598. ISSN 0308-597X. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.marpol.2007.03.002
- Carnival Corporation & Plc (CARNIVAL CORP.), 2010. *Sustainability Report Fiscal Year 2010*. Verfügbar unter: <https://www.carnivalcorp.com/static-files/affe6793-b0bf-480d-9e00-cff96fafa3fb>
- Carnival Corporation & Plc (CARNIVAL CORP.), 2013. *Sustainability Report FY2013*. Verfügbar unter: <https://www.carnivalcorp.com/static-files/affe6793-b0bf-480d-9e00-cff96fafa3fb>
- Carnival Corporation & Plc (CARNIVAL CORP.), 2016. *Sustainability from ship to shore. FY2016 Sustainability Report*. Verfügbar unter: https://carnival-sustainability-2022.nyc3.digitaloceanspaces.com/assets/content/pdf/2016_Carnival_Sustainability_Report.pdf
- Carnival Corporation & Plc (CARNIVAL CORP.), 2018a. *2017 ANNUAL REPORT*. Verfügbar unter: <https://www.carnivalcorp.com/financial-information/annual-reporting/>
- Carnival Corporation & Plc (CARNIVAL CORP.), 2018b. *Sustainability from Ship to Shore. FY2018 Sustainability Report*.
- Carnival Corporation & Plc (CARNIVAL CORP.), 2019. *Sustainability from ship to shore. FY2019 Sustainability Report*. Verfügbar unter: https://carnival-sustainability-2022.nyc3.digitaloceanspaces.com/assets/content/pdf/Carnival-Corporation-plc_2019-Sustainability-Report_Full.pdf

- Carnival Corporation & Plc (CARNIVAL CORP.), 2021. *Sustainable from ship to shore. 2021 Sustainability Report*. Verfügbar unter: https://carnival-sustainability-2022.nyc3.digitaloceanspaces.com/assets/content/pdf/FY-2021-Sustainability-Report_Carnival-Corporation-and-plc.pdf
- CHAE, S.R. und H.S. SHIN, 2007. Effect of condensate of food waste (CFW) on nutrient removal and behaviours of intercellular materials in a vertical submerged membrane bioreactor (VSMBR). *Biore-source Technology*, **98**(2), 373-379. ISSN 0960-8524. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.biortech.2005.12.019
- CHEN, W., 2012. *Wärtsilä Hamworthy opts for separate treatment of grey water*. Verfügbar unter: <https://web.archive.org/web/20130212030148/http://www.wartsila.com/en/hamworthy-opts-for-separate-treatment-of-grey-water>
- CHEN, W., 2014. Experience in Nitrogen Removal on Board Ships. In: J. PINNEKAMP und M. JOSWIG, Hg. *Marine environmental protection. International Symposium on Treatment of Wastewater and Waste on Ships ; SOWOS 7 - 15.11.2013, Hamburg ; BSH/IUVA/SOWOS Workshops - 06.-08.03.2013, Hamburg ; SOWOS 6 - 16.11.2012, Hamburg ; BSH/PIA Workshop - 15.11.2012, Hamburg; [7th International Symposium Treatment of Wastewater and Waste on Ships*. Aachen: Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V. ISBN 9783938996393.
- CHIESA, S.C., R.L. IRVINE und J.F. MANNING, 1985. Feast/famine growth environments and activated sludge population selection. *Biotechnology and Bioengineering*, **27**(5), 562-568. ISSN 1097-0290. Verfügbar unter: doi:10.1002/bit.260270503
- COLÓN, J., A.A. FORBIS-STOKES und M.A. DESHUSSES, 2015. Anaerobic digestion of undiluted simulant human excreta for sanitation and energy recovery in less-developed countries. *Energy for Sustainable Development*, **29**, 57-64. ISSN 09730826. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.esd.2015.09.005
- CONTRERAS, E.M., N.C. BERTOLA, L. GIANNUZZI und N.E. ZARITZKY, 2002. A modified method to determine biomass concentration as COD in pure cultures and in activated sludge systems. *Water SA*, **28**(4). Water SA. Verfügbar unter: doi:10.4314/wsa.v28i4.4920
- Costa Cruise, 2011. *Bilancio Socio-Ambientale 2011*. Verfügbar unter: http://www.costacruise-sasia.com/B2C/SharedResources/Corporate/BSA/2011/ita/pdf/BSA2011_Ita.pdf
- Costa Cruise, 2015. *Sustainability Report 2015. Results and Outlook*. Verfügbar unter: <http://www.maritimecsr.com/files/reports/2015/cc2015.pdf>
- Costa Cruise, 2018. *Sustainability Report 2018. Results and Outlook*.
- Costa Cruise, 2021. *Sustainability Report 2021*.
- CUMMINGS, J.H., S.A. BINGHAM, K.W. HEATON und M.A. EASTWOOD, 1992. Fecal weight, colon cancer risk, and dietary intake of nonstarch polysaccharides (dietary fiber). *Gastroenterology*, **103**(6), 1783-1789. ISSN 00165085. Verfügbar unter: doi:10.5555/uri:pii:0016508592914357
- DENG, S.-M. und J. BURNETT, 2002. Water use in hotels in Hong Kong. *International Journal of Hospitality Management*, **21**(1), 57-66. ISSN 02784319. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0278-4319(01)00015-9
- DWA, 2010. *Abwasser aus Krankenhäusern und anderen medizinischen Einrichtungen*. Dezember 2010. Hennef: DWA. DWA-Regelwerk. M 775. ISBN 978-3-941897-62-5.
- DZIEGIELEWSKI, B., 2000. *Commercial and institutional end uses of water*: American Water Works Association. ISBN 1583210350.

- EDRO Corp., 2015. *Laundry Planning Guide*. Verfügbar unter: <https://www.edrocorp.com/planning-guide.html>
- Electrolux, 2009. *Project Planning and Calculating Dimensions*. Verfügbar unter: <https://www.comls.com.au/wp-content/uploads/2016/01/Project-Planning-Calculating-Dimensions.pdf>
- ERIKSSON, E., K. AUFFARTH, M. HENZE und A. LEDIN, 2002. Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, **4**(1), 85-104. ISSN 1462-0758. Verfügbar unter: doi:10.1016/S1462-0758(01)00064-4
- FENU, A., G. GUGLIELMI, J.A. JIMENEZ, M. SPÉRANDIO, D. SAROJ, B. LESJEAN, C. BREPOLS, C. THOEYE und I. NOPENS, 2010. Activated sludge model (ASM) based modelling of membrane bio-reactor (MBR) processes: a critical review with special regard to MBR specificities. *Water research*, **44**(15), 4272-4294. *Water research*. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.watres.2010.06.007
- FOREMAN-MACKEY, D., 2016. corner.py: Scatterplot matrices in Python. *Journal of Open Source Software*, **1**(2), 24. ISSN 2475-9066. Verfügbar unter: doi:10.21105/joss.00024
- FRIEDLER, E., D. BUTLER und D.M. BROWN, 1996. Domestic WC usage patterns. *Building and Environment*, **31**(4), 385-392. ISSN 03601323. Verfügbar unter: doi:10.1016/0360-1323(96)00008-X
- FRIEDLER, E., D.M. BROWN und D. BUTLER, 1996. A study of WC derived sewer solids. *Water Science and Technology*, **33**(9). ISSN 0273-1223. Verfügbar unter: doi:10.1016/0273-1223(96)00365-4
- GOSOLITS, B., P. KLEIN und J. KURZ, 2000. *Waschmittel- und Wasserrecycling in gewerblichen und Krankenhauswäschereien (Phase 1)*. TV 1: Grundlegende Erforschung der wissenschaftlichen und technischen Möglichkeiten (Fundamental analysis of scientific and technical possibilities). Bönningheim.
- GÖSSLING, S., 2001. The consequences of tourism for sustainable water use on a tropical island: Zanzibar, Tanzania. *Journal of environmental management*, **61**(2), 179-191. *Journal of environmental management*. Verfügbar unter: doi:10.1006/jema.2000.0403
- GUJER, W., M. HENZE, M. TAKAHASHI und M.C.M. van LOOSDRECHT, 1999. Activated Sludge Model No. 3. *Water Science and Technology*, **39**(1), 183-193. ISSN 0273-1223. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0273-1223(98)00785-9
- HAN, D.H., 2017. A Recycling Method of Food Waste by Drying and Fuelizing. *Journal of Ecophysiology and Occupational Health*, **16**(1-2), 52-58. *Journal of Ecophysiology and Occupational Health*. Verfügbar unter: doi:10.18311/jeoh/2016/15637
- HAN, M.J., S.K. BEHERA und H.-S. PARK, 2012. Anaerobic co-digestion of food waste leachate and piggyery wastewater for methane production: statistical optimization of key process parameters. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **87**(11), 1541-1550. ISSN 0268-2575. Verfügbar unter: doi:10.1002/jctb.3786
- HAUDUC, H., L. RIEGER, T. OHTSUKI, A. SHAW, I. TAKÁCS, S. WINKLER, A. HÉDUIT, P.A. VANROLLEGHEM und S. GILLOT, 2011a. Activated sludge modelling: development and potential use of a practical applications database. *Water Science and Technology*, **63**(10), 2164-2182. ISSN 0273-1223. Verfügbar unter: doi:10.2166/wst.2011.368
- HAUDUC, H., M.B. NEUMANN, D. MUSCHALLA, V. GAMERITH, S. GILLOT und P.A. VANROLLEGHEM, 2011b. Towards quantitative quality criteria to evaluate simulation results in wastewater treatment – A critical review. In: *Watermatex - IWA Symposium on Systems Analysis and Integrated Assessment*, S. 36-46.

HEATON, K.W., J. RADVAN, H. CRIPPS, R.A. MOUNTFORD, F.E. BRADDON und A.O. HUGHES, 1992. Defecation frequency and timing, and stool form in the general population: a prospective study. *Gut*, **33**(6), 818. Gut. Verfügbar unter: doi:10.1136/gut.33.6.818

Helcom, 1990. *Guidelines for capacity calculation of sewage system on board passenger ships*. HELCOM Recommendation 11/10.

Helcom, 2020. *Baltic Sea Sewage Port Reception Facilities. HELCOM overview 2019*. Verfügbar unter: <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2021/04/Baltic-Sea-Sewage-PRF-overview-2019.pdf>

HELLSTRÖM, D. und E. KÄRRMAN, 1996. Nitrogen and Phosphorus in Fresh and Stored Urine. In: J. STAUDENMANN, Hg. *Recycling the resource. Proceedings of the second International Conference on Ecological Engineering for Wastewater Treatment, School of Engineering Wädenswil - Zürich*, 18. - 22. September 1995. Zürich-Uetikon: Transtec Publications, S. 221-226. ISBN 9783035739824. Verfügbar unter: <https://main.scientific.net/Ebook/PaperDownload?isbnEbook=978-3-0357-3982-4&toclid=235>

HENZE, M., 2008. *Biological wastewater treatment. Principles, modelling and design*. London: IWA Publishing. ISBN 9781843391883.

HENZE, M., C. GRADY, W. GUJER, G. MARAIS und T. MATSUO, 1987. A general model for single-sludge wastewater treatment systems. *Water research*, **21**(5), 505-515. Water research. Verfügbar unter: doi:10.1016/0043-1354(87)90058-3

HENZE, M., W. GUJER, T. MINO und M. VAN LOOSDRECHT, 2015. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. *Water Intelligence Online*, **5**, 9781780402369. Water Intelligence Online. Verfügbar unter: doi:10.2166/9781780402369

HOSSEINI-ASSAL, S.M.K. und S.D. HOSSEINI, 2000. Determination of the mean daily stool weight, frequency of defecation and bowel transit time: assessment of 1000 healthy subjects. *ARCHIVES OF IRANIAN MEDICINE*, **3**(4), 0. ISSN 1029-2977. Verfügbar unter: <https://www.sid.ir/en/journal/View-Paper.aspx?id=29571>

International Tourism Partnership, 2008. *Environmental Management for Hotels. The Industry Guide to Sustainable Operation*. Verfügbar unter: <https://www.greenhotelier.org/category/our-manuals/environmental-management-for-hotels/>

JANG, H.M., M.-S. KIM, J.H. HA und J.M. PARK, 2015. Reactor performance and methanogenic archaea species in thermophilic anaerobic co-digestion of waste activated sludge mixed with food wastewater. *Chemical Engineering Journal*, **276**, 20-28. ISSN 1385-8947. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cej.2015.04.072

JEPSSON, U., 1996. *Modelling aspects of wastewater treatment processes*. PhD thesis. ISBN 9188934004. Verfügbar unter: <https://www.iea.lth.se/publications/Theses/LTH-IEA-1010.pdf>

JÖNSSON, H., A. BAKY, U. JEPSSON, D. HELLSTRÖM und E. KÄRRMAN, 2005. *Composition of urine, faeces, greywater and biowaste. for utilisation in the URWARE model*. Gothenburg. Urban Water Report. 2005:6.

KAISER, A., 2014. On characterizing domestic wastewater on inland waterway passenger ships. In: J. PINNEKAMP und M. JOSWIG, Hg. *Marine environmental protection. International Symposium on Treatment of Wastewater and Waste on Ships ; SOWOS 7 - 15.11.2013, Hamburg ; BSH/IUVA/SOWOS Workshops - 06.-08.03.2013, Hamburg ; SOWOS 6 - 16.11.2012, Hamburg ; BSH/PIA Workshop - 15.11.2012, Hamburg ; [7th International Symposium Treatment of Wastewater*

- and Waste on Ships*. Aachen: Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V., 43/1-43/15. ISBN 9783938996393.
- KAMPERIDIS, T., P.K. PANDIS, C. ARGIRUSIS, G. LYBERATOS und A. TREMOULI, 2022. Effect of Food Waste Condensate Concentration on the Performance of Microbial Fuel Cells with Different Cathode Assemblies. *Sustainability*, **14**(5), 2625. Sustainability. Verfügbar unter: doi:10.3390/su14052625
- KARTES, A., 2020. *Formulation of synthetic cruise ship wastewater with special regard to COD fractionation*. Master Thesis. Hannover.
- Kim Min-Kyung, Kwon Ki-Wook, Mo Kyung, Cui Feng-Hao, Park Se-Yong und Kim Moon-II, 2020. 음식물류폐기물의 건식사료화 공정에서 발생하는 응축수로부터 유기탄소 추출. *유기물자원화*, **28**(2), 41-48. ISSN 1225-6498. Verfügbar unter: doi:10.17137/KORRAE.2020.28.2.41
- KNERR, H., 2012. *Untersuchungen zur Zusammensetzung und zum Abbau von Schwarzwasser mittels des Belebungsverfahrens sowie zur Kinetik des heterotrophen und autotrophen Stoffwechsels*. Dissertation. Kaiserslautern. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-31665>
- KOCH, G., M. KÜHNI, W. GUJER und H. SIEGRIST, 2000. Calibration and validation of activated sludge model no. 3 for Swiss municipal wastewater. *Water research*, **34**(14), 3580-3590. Water research. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0043-1354(00)00105-6
- LARSEN, T.A., K.M. UDERT und J. LIENERT, Hg., 2013. *Source Separation and Decentralization for Wastewater Management*: IWA Publishing. ISBN 9781780401072.
- LEE, D.H., S.K. BEHERA, J.W. KIM und H.-S. PARK, 2009. Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: a lab-scale study. *Waste Management*, **29**(2), 876-882. ISSN 0956-053X. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.wasman.2008.06.033
- LEWIS, S.J. und K.W. HEATON, 1997. Stool form scale as a useful guide to intestinal transit time. *Scandinavian journal of gastroenterology*, **32**(9), 920-924. ISSN 0036-5521. Verfügbar unter: doi:10.3109/00365529709011203
- LI, A., J. LUO, D. HUANG, J. MA und J. TANG, 2015. Water quality characteristics of condensate from sludge drying process. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **9**(1), 253-256. Chinese Journal of Environmental Engineering. Verfügbar unter: doi:10.12030/j.cjee.20150142
- LINDEBOOM, R., J. de PAEPE, M. VANOPPEN, B. ALONSO-FARIÑAS, W. COESSENS, A. ALLOUL, M. CHRISTIAENS, C. DOTREMONT, H. BECKERS, B. LAMAZE, D. DEMEY, P. CLAUWAERT, A. VERLIEFDE und S.E. VLAEMINCK, 2020. A five-stage treatment train for water recovery from urine and shower water for long-term human Space missions. *Desalination*, **495**, 114634. ISSN 0011-9164. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.desal.2020.114634
- LOU, I.C. und F.L. de LOS REYES, 2005. Integrating decay, storage, kinetic selection, and filamentous backbone factors in a bacterial competition model. *Water Environment Research*, **77**(3), 287-296. ISSN 10614303. Verfügbar unter: doi:10.2175/106143005x41870
- MEINZINGER, F. und M. OLDENBURG, 2009. Characteristics of source-separated household wastewater flows: a statistical assessment. *Water Science and Technology*, **59**(9), 1785-1791. ISSN 0273-1223. Verfügbar unter: doi:10.2166/wst.2009.185
- Meyer Werft, 2010. *Zusammenstellung von Mess- und Auslegungswerten*.

- MEYER, S.S. und P.A. WILDERER, 2004. Reject water: treating of process water in large wastewater treatment plants in Germany--a case study. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **39**(7), 1645-1654. ISSN 1093-4529. Verfügbar unter: doi:10.1081/ESE-120037866
- MIRICHO, N.M., 2021. *Modelling of wastewater generation and storage on cruise ships*. Research Project. Hannover.
- MOBLEY, H.L., M.D. ISLAND und R.P. HAUSINGER, 1995. Molecular biology of microbial ureases. *Microbiological reviews*, **59**(3), 451-480. ISSN 0146-0749. Verfügbar unter: doi:10.1128/mr.59.3.451-480.1995
- MUELLER, E., J. LATINI, M. LUX, U. STABLEIN, L. BRUBAKER, K.J. KREDER und M.P. FITZ-GERALD, 2005. Gender differences in 24-hour urinary diaries of asymptomatic North American adults. *The Journal of urology*, **173**(2), 490-492. ISSN 0022-5347. Verfügbar unter: doi:10.1097/01.ju.0000149947.28100.cd
- MURAT HOCAOGLU, S., G. INSEL, E. UBAY COKGOR, A. BABAN und D. ORHON, 2010. COD fractionation and biodegradation kinetics of segregated domestic wastewater: black and grey water fractions. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **85**(9), 1241-1249. ISSN 0268-2575. Verfügbar unter: doi:10.1002/jctb.2423
- NURISHI, M., K. IZUIMI und K. KARIYA, 1998. Study of filterability of mixed liquor in submerged membrane bioreactor activated sludge process. In: *Proceedings of the 32th annual meeting of Japan Association of the Environmental Studies*.
- OHLE, P., H. KEUTGEN und J. NOBLE, 2009. Wastewater treatment on ships with ZeeWeed MBR technology. In: J. PINNEKAMP und M. REITZ, Hg. *Marine environmental protection. International Symposium SOWOS 3, 13.11.2009 Hamburg ; [3rd International Symposium Treatment of Wastewater and Waste on Ships*. Aachen: Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen, 12/1-12/18. ISBN 9783938996256.
- OLSSON, G., M. NIELSEN, A. LYNNGAARD JENSEN und Z. YUAN, 2005. *Instrumentation, control and automation in wastewater systems*. London: IWA. Scientific and technical report. 15. ISBN 9781900222839.
- PARSONS, M., W. TISSOT, L. CARDOZO, A. DIOKNO, C.L. AMUNDSEN und A.C. COATS, 2007. Normative bladder diary measurements: night versus day. *Neurourology and urodynamics*, **26**(4), 465-473. ISSN 0733-2467. Verfügbar unter: doi:10.1002/nau.20355
- PENN, R., B.J. WARD, L. STRANDE und M. MAURER, 2018. Review of synthetic human faeces and faecal sludge for sanitation and wastewater research. *Water research*, **132**, 222-240. Water research. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.watres.2017.12.063
- PINNEKAMP, J. und E. DORGELOH, 2008. *Erfassung der Abwasserzusammensetzung und Abwasservolumenströme auf Flusskreuzfahrtschiffen. Abschlussbericht*. Aachen. Verfügbar unter: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/wasser/klaeranlage_abwasser/Abschlussbericht_kreuzfahrt.pdf
- PITMAN, A., 1999. Management of biological nutrient removal plant sludges — Change the paradigms? *Water research*, **33**(5), 1141-1146. Water research. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0043-1354(98)00316-9

- RAUCH, W., D. BROCKMANN, I. PETERS, T.A. LARSEN und W. GUJER, 2003. Combining urine separation with waste design: an analysis using a stochastic model for urine production. *Water research*, **37**(3), 681-689. Water research. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0043-1354(02)00364-0
- REITER, J. und M. BEIER, 2023. Deammonification Potential of Pig Slurries and Vapor Condensates from Sewage Sludge Drying—Substrate Quality and Inhibition. *Bioengineering*, **10**(7), 826. ISSN 2306-5354. Verfügbar unter: doi:10.3390/bioengineering10070826
- RENDTORFF, R.C. und M. KASHGARIAN, 1967. Stool patterns of healthy adult males. *Diseases of the colon and rectum*, **10**(3), 222-228. ISSN 0012-3706. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF02617184
- ROSE, C., A. PARKER, B. JEFFERSON und E. CARTMELL, 2015. The Characterization of Feces and Urine: A Review of the Literature to Inform Advanced Treatment Technology. *Critical reviews in environmental science and technology*, **45**(17), 1827-1879. ISSN 1064-3389. Verfügbar unter: doi:10.1080/10643389.2014.1000761
- SCHEEPERS, H.M. und H.E. JACOBS, 2014. Simulating residential indoor water demand by means of a probability based end-use model. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, **63**(6), 476-488. ISSN 0003-7214. Verfügbar unter: doi:10.2166/aqua.2014.100
- SCHUMÜLLER, K., D. WEICHHREBE und S. KÖSTER, 2021. Biogas potential of organic waste onboard cruise ships — a yet untapped energy source. *Biomass Conversion and Biorefinery*. ISSN 2190-6815. Verfügbar unter: doi:10.1007/s13399-020-01249-0
- SHEMEROVSKII, K.A., 2002. Circadian rhythm of rectal reactivity in individuals with regular and irregular bowel evacuation function. *Bulletin of experimental biology and medicine*, **134**(6), 565-567. ISSN 0007-4888. Verfügbar unter: doi:10.1023/A:1022965212971
- SHEN, W. und G. XING, 2017. Study on vessel sewage treatment technologies. In: *2nd International Conference on Materials Science, Resource and Environmental Engineering (MSREE 2017)*: Author(s), S. 40041. Verfügbar unter: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5005243>
- STOLL, U. und H. GUPTA, 1997. Management Strategies for Oil and Grease Residues. *Waste Management & Research*, **15**(1), 23-32. ISSN 0734-242X. Verfügbar unter: doi:10.1177/0734242X9701500103
- STYLES, D., H. SCHOENBERGER und J.L. GALVEZ-MARTOS, 2015. Water management in the European hospitality sector: Best practice, performance benchmarks and improvement potential. *Tourism Management*, **46**, 187-202. ISSN 0261-5177. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tourman.2014.07.005
- STYLES, D., H. SCHÖNBERGER und J.L. GALVEZ MARTOS, 2013. *Best environmental management practice in the tourism sector. Learning from frontrunners*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. EUR, Scientific and technical research series. 26022. ISBN 978-92-79-30895-6.
- TAKÁCS, I., A.-E. STRICKER, S. ACHLEITNER, A. BARRIE, W. RAUCH und S. MURTHY, 2008. Do You Know Your Sludge Age? *Proceedings of the Water Environment Federation*, **2008**(13), 3639-3655. ISSN 19386478. Verfügbar unter: doi:10.2175/193864708788733486
- THIEMIG, C., 2011. *Die Bedeutung der Filtrationseigenschaften von belebten Schlämmen beim Betrieb von Membranbioreaktoren*. Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Siedlungsabfallwirtschaft und Institut für Siedlungswasserwirtschaft. Dissertation. Aachen. ISBN 978-3-938996-32-4. Verfügbar unter: <http://publications.rwth-aachen.de/record/64147>

- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), 2000. *Technical Development Document for Final Action Regarding Pretreatment Standards for Industrial Laundries - 2000*. Washington, DC. Verfügbar unter: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-11/documents/industrial_laundries_tdd_2000.pdf
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), 2006a. *Sampling Episode Report - Holland America Oosterdam. Sampling Episode 6506*. Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), 2006b. *Sampling Episode Report - Holland America Veendam. Sampling Episode 6503*. Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), 2006c. *Sampling Episode Report - Norwegian Star. Sampling Episode 6504*. Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), 2006d. *Sampling Episode Report - Princess Cruise Lines - Island Princess. Sampling Episode 6505*. Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), 2008. *Cruise Ship Discharge Assessment Report*. EPA842-R-07-005.
- UDERT, K.M., T.A. LARSEN, M. BIEBOW und W. GUJER, 2003. Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system. *Water research*, **37**(11), 2571-2582. Water research. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0043-1354(03)00065-4
- VAN HAARST, E.P., 2015. *The evaluation of voiding patterns. An analysis of frequency-volume charts and symptom scores*. Utrecht. Verfügbar unter: http://continentie-stichting.nl/sites/default/files/users/moderator/proefschrift_van_haarst-2015.pdf#page=13
- VAN HAARST, E.P., E.A. HELDEWEG, D.W. NEWLING und T.J. SCHLATMANN, 2004. The 24-h frequency-volume chart in adults reporting no voiding complaints: defining reference values and analysing variables. *BJU international*, **93**(9), 1257-1261. ISSN 1464-4096. Verfügbar unter: doi:10.1111/j.1464-4096.2004.04821.x
- VAN OIJEN, M., Hg., 2020. *Bayesian Compendium*. Cham: Springer International Publishing; Imprint: Springer. Springer eBook Collection. ISBN 978-3-030-55896-3.
- VIKAINEN, J., 2012. *Holistic Evaluation of Cruise Vessel Advanced Wastewater Purification Process through Mass Balance*. Bachelor thesis. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu. Verfügbar unter: http://www.theseus.fi/bitstream/10024/54011/1/Vikainen_Jussi.pdf
- VOSE, D., 2010. *Risk analysis. A quantitative guide*. 3. ed., Repr. Chichester: Wiley. ISBN 978-0-470-51284-5.
- WHEATLEY, A.D. und S. SURENDRAN, 2008. Greywater treatment and reuse results from a 50-person trial. *Urban Water Journal*, **5**(3), 187-194. ISSN 1573-062X. Verfügbar unter: doi:10.1080/15730620802013177