

## **Problemstoff Schwefelwasserstoff - Simulation von Entwässerungssystemen zur Schaffung von sicheren Bemessungsgrundlagen für moderne Abluftbehandlungsanlagen an Pumpwerken und auf Kläranlagen**

*A. Obermayer, S. Maroß, K. Jilg – UNITECHNICS KG, Schwerin*

### Zusammenfassung

Schwefelwasserstoff ist ein Gefahrstoff und fester Bestandteil der Atmosphären in Entwässerungsanlagen. Zum einen, weil Sulfide direkt in das Abwasser eingeleitet werden, zum anderen, weil sie quasi zwangsläufig beim Abwassertransport entstehen. Emissionen sind somit unvermeidlich, eine Behandlung der Abluft in vielen Fällen ebenso. Die Bemessung der Abluftbehandlungsanlagen erfolgt dabei meist auf Basis von Erfahrungswerten, vor allem weil die zu behandelnden Frachten nicht bekannt sind. Das Ergebnis ist dann ein Durchschlagen von Belastungsspitzen mit entsprechendem Gefährdungspotential und/oder ein unwirtschaftlicher Betrieb der Anlagen. Ziel muss es deshalb sein, eine gesicherte Bemessungsgrundlage zu schaffen, welche den Einsatz moderner, technischer Abluftbehandlungen ermöglicht und ein dem Gefahrstoff angemessenes Schutzpotential garantiert. Hierfür können Berechnungen mit dem GIS basierten Programm SULFIDUS genutzt werden, das die Sulfidentstehung berechnet und unterschiedlichste Lastfälle abbilden kann. An zwei Beispielen wird gezeigt, wie moderne Abluftbehandlungsanlagen bei Entwässerungsanlagen konzipiert sein können, um den Herausforderungen von Schwefelwasserstoff gezielt wirtschaftlich begegnen zu können.

Hydrogen sulphide – Simulation of sewer networks as an assessment basis for modern waste air treatment at pumping stations and at wastewater treatment plants

### Abstract

Hydrogen sulfide is a hazardous substance and an integral part of the atmospheres in sewer systems. On the one hand, because sulfides are introduced directly into the waste water, on the other hand, because they are almost inevitably generated during the transportation process. Emissions are therefore inevitable, a treatment of exhaust air in many cases as well. The design of the exhaust air treatment plants is usually based on empirical values, mainly because the loads to be treated are not known. The result is then a pass-through of load peaks with corresponding risk potential and / or uneconomical operation of the plants. The goal must therefore be to create a reliable assessment basis which allows the use of modern, technical exhaust air treatment and guarantees a protective potential that is appropriate to the hazardous substance. For this purpose, calculations can be used with the GIS-based SULFIDUS program, which calculates the sulfide development and can represent a wide variety of load cases. Two examples show how modern exhaust air treatment plants can be designed for drainage systems in order to meet the challenges of hydrogen sulfide in a targeted manner.

## 1. Einleitung

Der Stoff, der am Häufigsten zu Geruchsbeschwerden in Zusammenhang mit Entwässerungssystemen führt, ist Schwefelwasserstoff. Die Geruchsbelästigungen sind aber nur ein Aspekt dieses Stoffes - die Gefährdung, die durch ihn für das Personal ausgeht, und der massive Angriff der Bausubstanz sind weitere.

Schwefelsäure, welche aus dem Schwefelwasserstoff gebildet wird, ist die Ursache für biogene Korrosion. Diese ist für 20 Prozent aller Schädigungen an Betonoberflächen in Abwasseranlagen verantwortlich [1], was die hohe Schadensrelevanz dokumentiert. Biogene Korrosion stellt somit eine der wichtigsten Herausforderungen dar, denen Betreiber von Abwasseranlagen heute gegenüberstehen.

Die aktuellen Entwicklungen, wie die in vielen Regionen rückläufige Bevölkerungsentwicklung und der rückläufige Abwasseranfall, verstärken zusätzlich die Schwefelwasserstoffentstehung in den Entwässerungsanlagen. Auch der zunehmend festzustellende Trend weiter entfernt gelegene Entwässerungsgebiete über lange Druckleitungen an die zentralen Abwasserbehandlungsanlagen anzuschließen wird dazu führen, dass Erscheinungen wie Geruch und biogene Korrosion uns in Zukunft vermehrt beschäftigen werden.

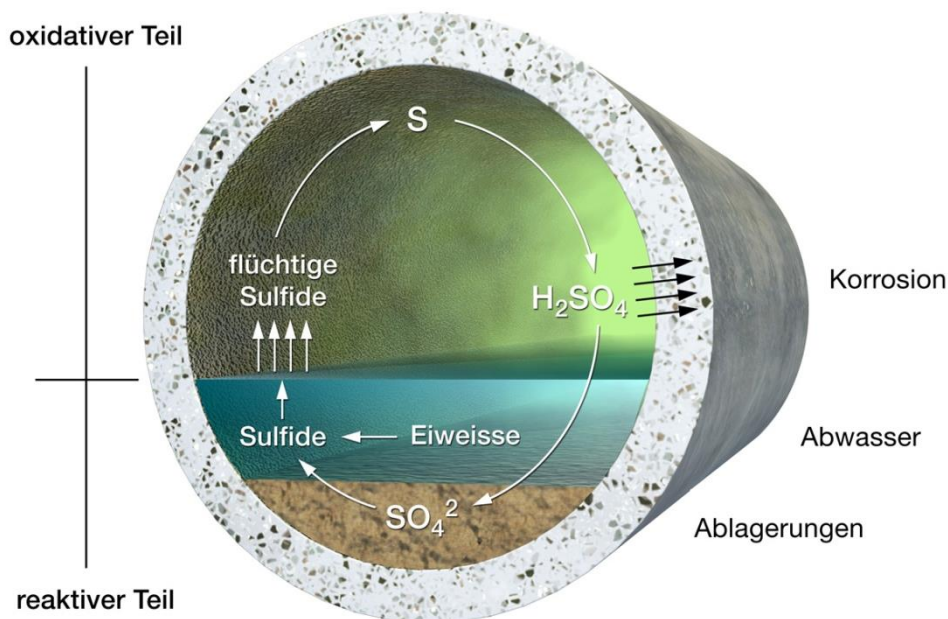
Gerade bei punktuell auftretenden Emissionen z. B. an Pumpwerken oder an Einleitstellen ist es notwendig, und häufig auch unvermeidlich, die Abluft zu reinigen. Die Bemessung für solche Anlagen fußt dabei häufig auf Messungen – die jedoch stets nur eine Momentaufnahme bieten -, Annahmen und Erfahrungen. Dabei ist es für eine moderne, technische Abluftbehandlung, die ein hohes Maß an Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit bieten muss, wichtig, die Bemessungsgrundlagen wie auftretende Frachtbelastungen bei allen Betriebszuständen zu kennen. Dies geht in Entwässerungssystemen aber nur dann, wenn die Bildung und der Abbau von Schwefelwasserstoff im Netz sicher ermittelt werden können. Dies ist durch rechnerische Ansätze realisierbar, welche auch Aussagen zu optimalen Standorten und Auswirkungen auf den Kanalbetrieb erlauben.

## 2. Wie entstehen Sulfide bzw. Schwefelwasserstoff bei der Entwässerung?

Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen Sulfiden, die in das Abwasser eingeleitet werden und solchen, die im Abwasser im Verlauf des Abwassertransportes gebildet werden. Im industriellen Bereich werden in vielen Prozessen Sulfide benötigt, bzw. bei diesen gebildet, die dann das Abwasser belasten können. Abwasser aus dem häuslichen Bereich enthält bei der Einleitung hingegen in der Regel kein bzw. nur verschwindend geringe Mengen an Sulfiden. Damit liegen direkte Einleitungen von Sulfiden im häuslichen Abwasserbereich meist unterhalb der Nachweisgrenze.

Im kommunalen Bereich ist jedoch die Bildung von Sulfid auf dem Fließwege die entscheidende Größe. Die Bildung geschieht dabei durch mikrobielle Stoffumsetzung. Dabei werden von hochgradig

spezialisierten Mikroorganismen Sulfat und organische Säuren durch dissimilatorische Stoffumsetzung oxidiert und es entsteht als Nebenprodukt Sulfid (Abbildung 1).

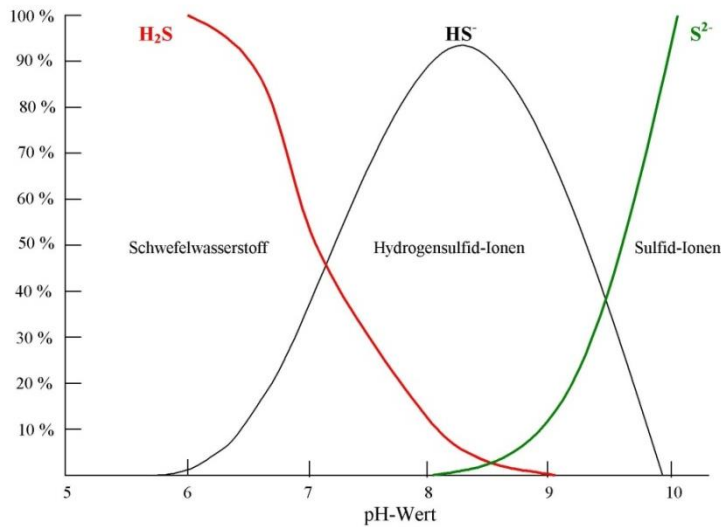


**Abbildung 1: Darstellung der Sulfidentwicklung, Emission und Einwirkung auf die Bausubstanz am Beispiel eines Freispiegelkanals [2]**

Diese Stoffumsetzungsprozesse finden in den anaeroben Zonen der Sielhaut statt. Daher ist Grundvoraussetzung, dass es zur Bildung von Sulfid im Bereich der Abwasserableitung kommt, die Ausbildung signifikanter anaerober Bereiche. Dies ist regelmäßig der Fall in langen Druckrohrleitungen, großen Freispiegelkanälen mit hohen Fließtiefen und Speichern wie z. B. Pumpenvorlagen mit entsprechenden Aufenthaltszeiten.

Wieviel Sulfid in den anaeroben Bereichen gebildet wird ist abhängig von einer Reihe von Rahmenbedingungen u. a. sind hier zu nennen Temperatur, organische Verschmutzung, Sauerstoffgehalt/ Nitrat, Sielhaut, Sulfatgehalt, pH-Wert, Fließgeschwindigkeit, Fließzeit und Betriebsweise/ -systeme.

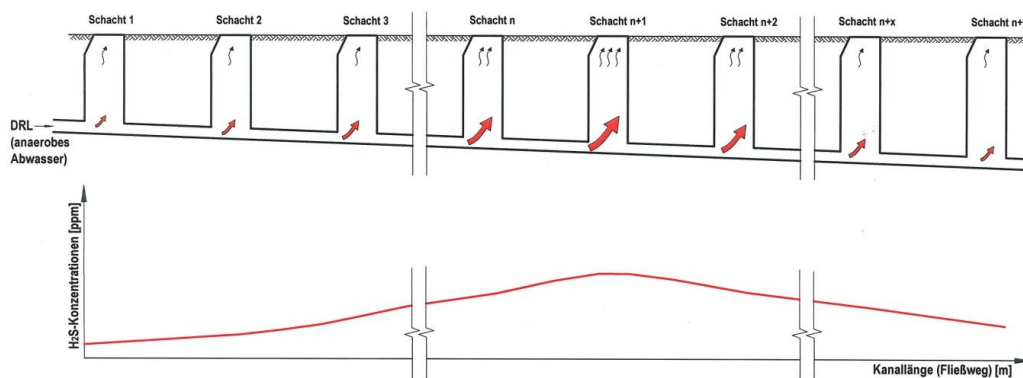
In welcher Stufe Sulfid im Abwasser vorliegt, ist stark abhängig vom pH-Wert (vgl. Abbildung 2). Sulfide sind genau genommen nur die  $S^{2-}$  Ionen [3], jedoch werden im allgemeinen Sprachgebrauch mit Sulfiden auch die anderen Stufen, also undissoziierter gelöster Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ) und Hydrogensulfid  $HS^-$ , bezeichnet. Diesem allgemeinen Sprachgebrauch soll auch in diesem Beitrag gefolgt werden.



**Abbildung 2: Sulfidgleichgewicht in Abhängigkeit vom pH-Wert [4]**

Schwefelwasserstoff ist ein Gas, das in Wasser nur sehr schwer löslich ist. Dadurch wird der Schwefelwasserstoff bei geeigneten Rahmenbedingungen aus dem Wasser emittieren. Dies ist z. B. der Fall nach Abwasserdruckleitungen, wenn sich die Druckverhältnisse ändern. Dann erfolgt jedoch keine vollständige Spontan-Emission sondern es beginnt der Prozess der Ausgasungen, welcher sich über eine längere Fließstrecke hinziehen kann. Bei Freispiegelkanälen entgast das gebildete Sulfid in der Regel zeit- und ortsnah.

Werden im Anschluss an Abwasserdruckleitungen über die Fließstrecke Schwefelwasserstoffmessungen durchgeführt, so zeigt sich, dass das Maximum der Emissionen in einiger Entfernung vom Übergabeort auftritt. Dies ist neben den Ausgasungseffekten auch den Ventilationsverhältnissen im Kanal geschuldet. Abbildung 3 zeigt schematisch den Verlauf der Emissionen im Freispiegelkanal nach einer Abwasserdruckleitung. Ist diese Emissionsstrecke nicht vorhanden, bzw. ist diese nicht lange genug, klingen die Emissionen auf der Strecke nicht vollständig ab und es kommt zu Belastung nachfolgender Anlagen wie Pumpwerke und Kläranlagen.



**Abbildung 3: Schematischer Verlauf der Emissionen nach einer Abwasserdruckrohrleitung im Freispiegelkanal**

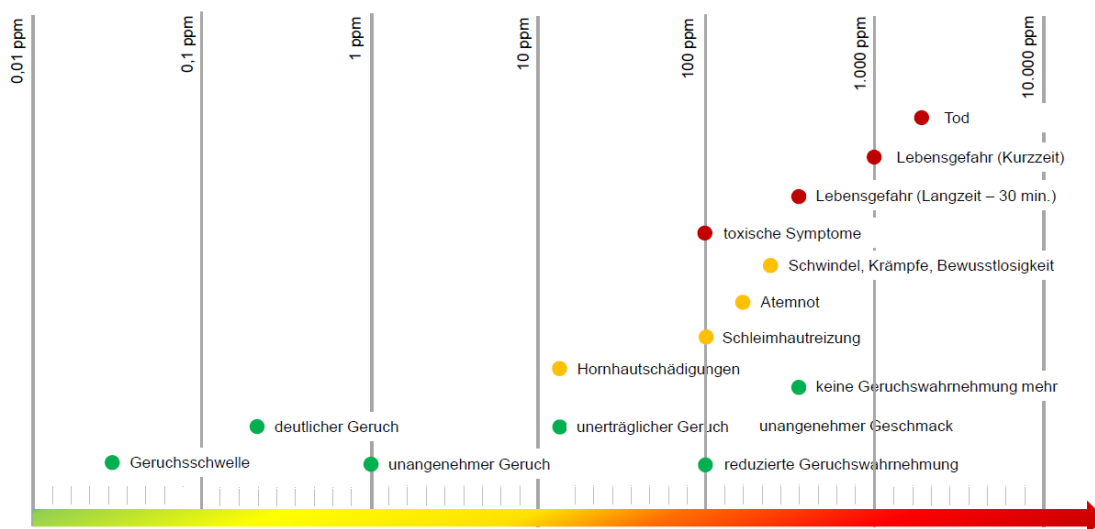
### 3. Schwefelwasserstoff als Gefahrstoff / Problemstoff

Schwefelwasserstoff ist ein Gefahrstoff [5]. Dadurch ergeben sich nach § 6 GefStoffV [6] für den Arbeitgeber umfangreiche Pflichten zur Informationsermittlung und Gefährdungsbeurteilung. Denn je nach Konzentration und Einwirkzeit kann der Kontakt mit Schwefelwasserstoff leichte oder dauerhafte Erkrankungen verursachen oder gar tödlich wirken. Dabei wird zum einen das Hämoglobin (rote Blutkörperchen) zerstört und zum anderen das zentrale und periphere Nervensystem geschädigt.

Bereits ab Konzentrationen von 0,001 ppm ist Schwefelwasserstoff prinzipiell wahrnehmbar. Jedoch zeigen diverse Betrachtungen, dass für die meisten Menschen die (eindeutige) Geruchsschwelle zwischen 0,05 und 0,1 ppm liegt, je nach persönlicher Empfindlichkeit.

Ab 0,3 ppm ist der Geruch nach „faulen Eiern“ dann deutlich wahrzunehmen. Bei 5,0 ppm liegt aktuell der Arbeitsplatzgrenzwert (AGW), welcher den MAK- Wert ersetzt hat. Ab etwa 100 ppm kommt es zu einer Lähmung des Geruchssinnes. Diese Tatsache zeigt die Gefährlichkeit von Schwefelwasserstoff auf, denn bereits ab 10 ppm kann es zu gesundheitlichen Schäden kommen. Zwischen 200 und 500 ppm kommt es zu Kopfschmerzen, Übelkeit, Schwindel und Bewusstlosigkeit. Ab 500 ppm geht der Geruchssinn komplett verloren. Bei einer Einwirkzeit von 30 min kann diese Konzentration zu einer lebensgefährlichen Vergiftung kommen. Ab 900 ppm reichen dafür Sekunden bis wenige Minuten. Ab 5.000 ppm stirbt ein Mensch in wenigen Sekunden.

In Abbildung 4 sind die wichtigsten Auswirkungen auf Organismen zusammengefasst dargestellt.



**Abbildung 4: Wirkung von Schwefelwasserstoff (erstellt in Anlehnung an [7])**

Neben der Tatsache, dass Schwefelwasserstoff ein Gefahrstoff ist, stellt er aus wirtschaftlich-betrieblicher Sicht auch einen Problemstoff dar. Denn im Gasraum, oberhalb des Wasserspiegels, sei es nun im Freispiegelkanal, im Pumpwerk oder in anderen Bauwerken, besteht durch Schwefelwasserstoff die Gefahr biogener Schwefelsäurekorrosion. Dabei wirkt nicht der Schwefelwasserstoff direkt korrosiv, vielmehr sind die sogenannten Sulfurikanten für seine aggressive

Wirkung verantwortlich. Bei den biologischen Umwandlungsprozessen dieser Mikroorganismen entsteht Schwefelsäure, die hochgradig aggressiv auf Betonoberflächen aber auch auf Stahl einwirkt (siehe Abbildung 1). Dabei werden unmittelbar an der Oberfläche pH-Werte teilweise deutlich unter 5 erreicht, was ein sicherer Indikator für biogene Schwefelsäurekorrosion ist.

Beton ist eine Mischung aus Wasser, Zement und Sand bzw. Kies. Das Calciumaluminat und Calciumsilikat des Zements reagieren mit der Schwefelsäure, wodurch die festigkeitsbildenden Bestandteile des Zementsteins zerstört werden. Zudem bildet sich Calciumsulfo-Aluminat bzw. Calciumsulfat. Diese Reaktionsprodukte sind größer als die Ausgangsprodukte und verursachen Treiberscheinungen, die letztlich zu einem Materialabtrag führen. Von biogener Schwefelsäurekorrosion betroffene Flächen haben dann häufig ein Aussehen ähnlich Waschbeton. Sie sind außerdem durch eine häufig gelblich-weiße Färbung gekennzeichnet.

#### 4. Berechnung von Schwefelwasserstofffrachten und –konzentrationen

Generell, und im Speziellen für Abluftbehandlungsanlagen gilt: Um Maßnahmen gegen Geruch und Korrosion bemessen zu können, ist es notwendig, mindestens die folgenden Punkte zu klären.

- Wie hoch ist die Sulfidfracht (Maximum und Durchschnitt)
- Reichweite und Stärke der Emissionen
- Menge der zu behandelnden Abluft

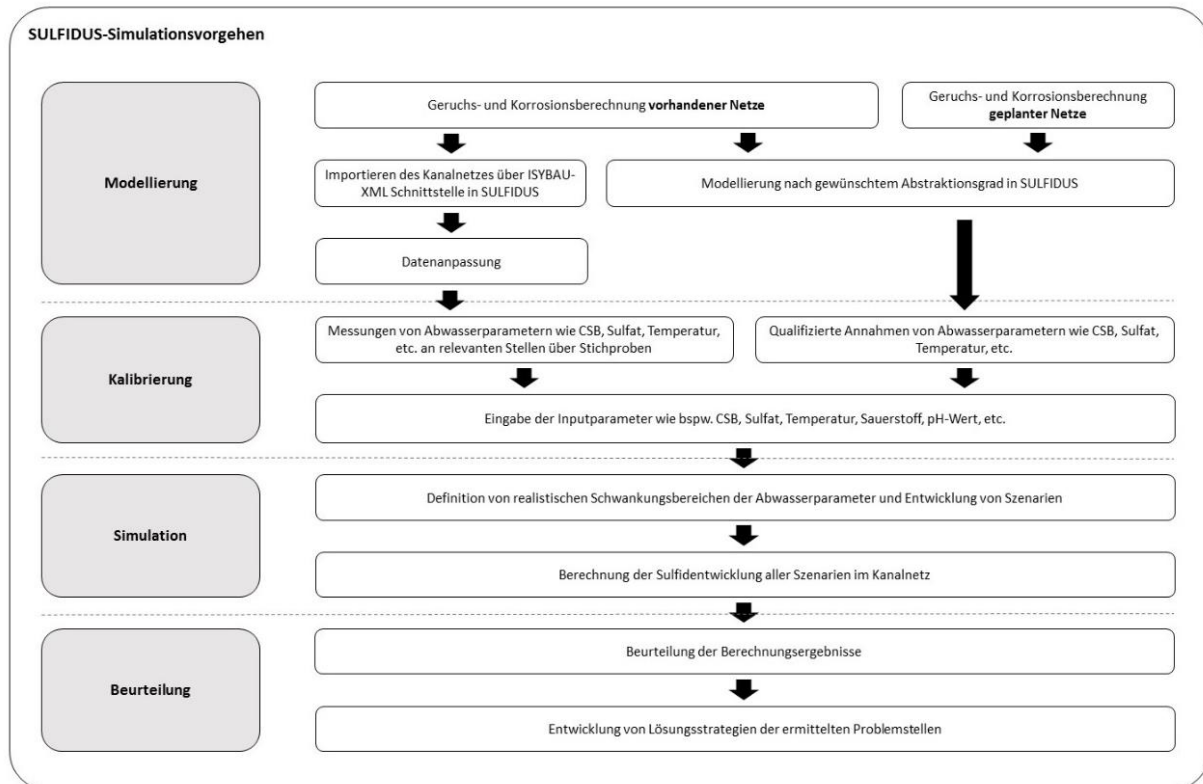
Darüber hinaus sollten in jedem Falle, auch um eine vorausschauende sichere Bemessung gewährleisten zu können, die ergänzenden Fragestellungen beantwortet werden:

- Was sind die Ursachen für die vorhandenen Belastungen?
- Wie sieht die zukünftige Entwicklung aus?

Diese Fragestellungen rein über eine Messung sicher erfassen zu wollen, ist nur in Ausnahmefällen möglich, nämlich nur dann, wenn die Belastungen sehr homogen verlaufen und die Abwasserzusammensetzung über längere Zeiträume hinweg keinen großen Schwankungen unterliegt. Also dann, wenn mit einer vertretbaren Dauer einer Messkampagne (zwei bis vier Wochen) mit Sicherheit alle relevanten Betriebszustände erfasst und für die Bemessung ausgewertet werden können.

Bei der hydraulischen Auslegung von Entwässerungssystemen ist eine Modellierung und anschließende hydrodynamische Berechnung heute selbstverständlich. Jedoch reichen die Möglichkeiten heute viel weiter. Durch eine Kopplung der hydraulischen Berechnung mit einer biochemischen Modellierung von Stoffumwandlungsprozessen ist es möglich, die Sulfidentwicklung und Sulfidemissionen in Entwässerungssystemen und deren Bauwerken sicher zu berechnen. Dies gilt dabei sowohl für vorhandene Systeme, als auch für Neuplanungen und geplante Umbauten.

Hierzu wurde von der Firma UNITECHNICS das GIS-basierte Programm SULFIDUS entwickelt. Dieses baut auf ein hauseigenes Berechnungsmodell auf, das seinen Ursprung in einer Kombination von Modellansätzen hat, die im Hochschulbereich entwickelt wurden. Dabei wurden das Modell und die einzelnen Ansätze darin kontinuierlich weiterentwickelt und mit umfangreichen Praxiserfahrungen kalibriert bzw. verifiziert. Die Erfahrung aus mehreren hundert Projekten und 20 Jahren Modellierungserfahrung im Bereich Sulfidbildung und Sulfidemissionen sind in diese zeitgemäße Form der Berechnungsdurchführung eingeflossen. Grundsätzlich gliedert sich jedes Projekt in die Abschnitte Modellierung – Kalibrierung – Simulation und Beurteilung (siehe Abbildung 5).



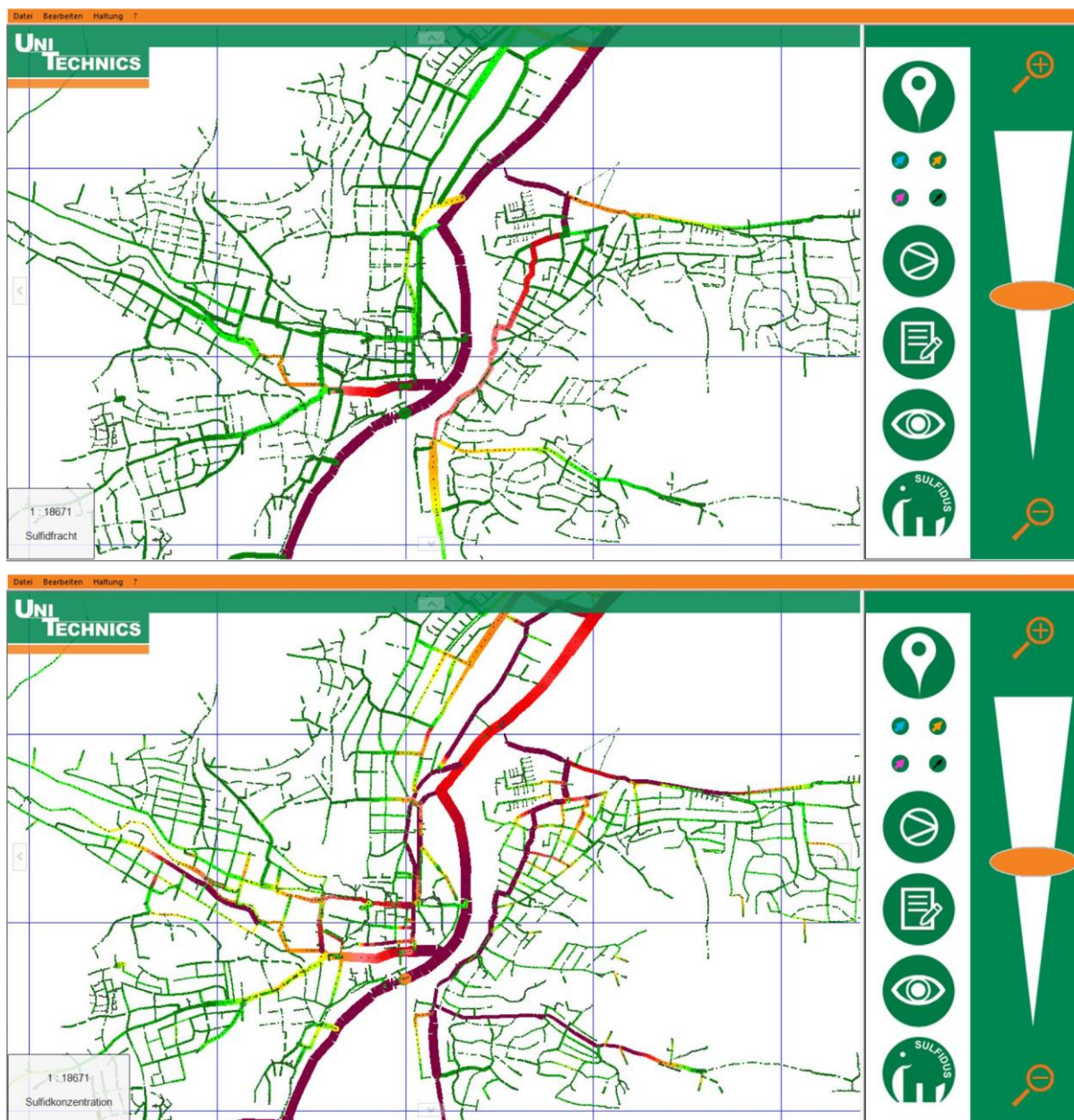
**Abbildung 5 Vorgehen bei der Durchführung zur Berechnung der Sulfidbildung und Sulfidemission**

SULFIDUS ist eine einfach zu bedienende Software für die Planung geruchsfreier Entwässerungssysteme. Mit der Eingabe von Parametern werden komplexe Stoffwechsel-Prozesse im Abwassernetz simuliert. So können Abbauprozesse, wie die Bildung von Sulfid ( $H_2S$ ), Ausgasungen oder Sauerstoffzehrung, präzise vorausberechnet werden. Im Ergebnis kann so die Entstehung von biogener Korrosion – und damit die Entstehung unangenehmer Gerüche – frühzeitig erkannt bzw. vermieden werden.

Durch die vorhandenen Schnittstellen zum Import von Kanalstammdaten ist ein einfacher Austausch mit den Kanaldatenbanken der Betreiber möglich. Ganze Netze oder Abschnitte können daraus importiert werden und es wird eine detaillierte, kleinteilige, haltungsgenaue Berechnung der Sulfidbildung und der Sulfidemissionen möglich. Genauso ist es aber auch im Rahmen einer Expertenmodellierung möglich, ein größeres Netz zu schaffen und über die Definition von Randbedingungen die Berechnung für aus dem Gesamtsystem herausgelöste Gebiete durchzuführen.

Darüber können dann einfach Aussagen zur Veränderung der Situation z. B. durch Neuanschlüsse von Industriebetrieben oder Neubaugebieten erarbeitet werden.

Die Kalibrierung ist ein wichtiger Bestandteil einer jeden Simulation. Hierfür sind Messungen im System unerlässlich. Dabei können auch wichtige Angaben zu weiteren Inputparametern generiert werden, indem Abwasserproben gezogen werden und die Aussagequalität der Modellierung dadurch erhöht wird. Liegen keine Angaben zu den Abwasserparametern vor, so hat sich im kommunalen Bereich eine Kombination aus der Nutzung von Standardparametern und die Durchführung von Sensitivitätsanalysen für die einzelnen Abwasserparameter bewährt.



**Abbildung 6: Darstellung der Ergebnisse für die Sulfidbildung (Sulfidfrachten und Sulfidkonzentrationen) für einen innerstädtischen Bereich. Die Einfärbung im Ampelprinzip visualisiert die Problembereiche, die Breite der dargestellten Kanalhaltungen ist abhängig von deren Durchmesser**



Neben diesen Sensitivitätsanalysen können bei den Simulationen selbst alle denkbaren Varianten berechnet werden: Standardvarianten wie Trocken- oder Regenwetterabflüsse, aber auch Speziallastfälle wie sporadische hochbelastete Einleitungen aus Gewerbe oder Industrie.

Im Rahmen der Beurteilung der Ergebnisse können dann Maßnahmen ermittelt, bemessen und bewertet werden. So sind die bei unterschiedlichen Lastfällen z. B. an Pumpwerken auftretenden Sulfidfrachten wichtige Eingangsgrößen für die Dimensionierung der Abluftbehandlungsanlagen. Dadurch wird eine technisch optimierte und somit wirtschaftliche Anlagenauslegung möglich.

Die Ergebnisse werden visualisiert (vgl. Abbildung 6). Dadurch können z. B. über Einfärbungen in Ampelfarben komplexe Ergebnisse einfach an Entscheidungsträger vermittelt werden.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ermöglichen dann zusätzlich eine betriebswirtschaftliche Optimierung der Herangehensweise an die Problematik Geruch und Korrosion. Damit können dann auf breiter und gesicherter Basis Entscheidungen zu gesamtheitlichen Strategien getroffen und sichere Investitionspläne zur Umsetzung der Maßnahmen aufgestellt werden.

## 5. Klassische Maßnahmen gegen Geruch und Korrosion

Zunächst gilt es festzuhalten, dass es die Maßnahme gegen Geruch und Korrosion nicht gibt. Vielmehr stellt die Auswahl stets eine Einzelfallentscheidung dar, welche aus einer Vielzahl möglicher Lösungen die für den spezifischen Fall optimale auswählt. Diese Entscheidung ist von vielen Randbedingungen - technischen, betrieblichen bis hin zu wirtschaftlichen - abhängig.

Hier alle möglichen Maßnahmen beschreiben zu wollen, würde den Rahmen sprengen. Hierfür sei z. B. auf [4] verwiesen. Hier sollen lediglich die folgenden Maßnahmen kurz umrissen werden. Auf den Aspekt der Abluftreinigung wird speziell in Punkt 5 eingegangen.

- Druckluftspülung
- Fällmitteldosierung (Eisenlösung)
- Abwasserfrischhaltung
- Geruchsdämpfungssysteme ggf. mit Sanierung

Häufig werden Druckluftspülstationen an den Pumpwerken installiert, mit deren Hilfe durch „Freiblasen“ der Leitungen die Aufenthaltszeiten in den Druckrohrleitungen reduziert werden können. Zahlreiche Erfahrungen zeigen, dass der Einbau von Druckluftspülstationen bei ca. 50 Prozent der Anlagen zu guten Ergebnissen führt, jedoch gibt es auch Fälle - gerade wenn mehrere Druckleitungen ineinander einleiten - in denen der Einbau von Kompressoren die Belastungen sogar noch erhöht. Die Errichtung der Druckluftspülstationen ist mit hohen Investitionskosten verbunden. Zudem entstehen durch den Energieverbrauch sehr hohe Betriebskosten.

Durch die Zugabe von Eisenlösungen (Fällmitteldosierung) in das Abwasser bildet sich schwer lösliches Eisensulfid, welches ausfällt und im üblichen pH-Wertbereich des Abwassers sich nicht mehr rücklöst. Dadurch wird der Sulfidgehalt des Abwassers und damit das Geruchs- und Korrosionspotenzial wirksam reduziert. Die Dosierung ist am Pumpwerkstandort zu empfehlen.

Durch Dosierung eines Sauerstoffdonators, z. B. Nitrat in ausreichender Menge, werden anaerobe Zustände in der Entwässerung vermindert und damit die Bildung von H<sub>2</sub>S reduziert bzw. verhindert. Jedoch ist die Bedingung hierfür, dass die Dosierung rechtzeitig erfolgt und dass die anaeroben Zustände auf der gesamten Rohrleitungsstrecke verhindert werden.

Die beschriebenen Dosierungen haben sich in der Praxis bewährt und sich als im Wesentlichen sichere Lösung zur Reduktion von Korrosionsproblemen erwiesen. Dafür reicht es aus, mittels einer Basisdosierung den Mittelwert der Schwefelwasserstoffemissionen zu drücken. Um jedoch auch die Geruchsproblematik mit diesen Maßnahmen in den Griff zu bekommen ist es nötig, zusätzlich auch die Spitzen der Schwefelwasserstoffemissionen zu kompensieren. Dies bedingt sehr hohe Dosiermengen mit der Folge eines hohen Verbrauchs an Dosiermitteln. Hier bietet sich eine Kombination mit der im Folgenden beschriebenen Lösung an.

Geruchsdämpfungssysteme verhindern nicht die Emission des Schwefelwasserstoffs aus dem Abwasser. Sie verhindern aber eine Emission des Schwefelwasserstoffs in Bereiche oberhalb der Einbauebene der Geruchsdämpfungssysteme. Dadurch können z. B. der Schachtraum (bei Einbau im Bermenbereich) vor Korrosion geschützt und Geruchsbelastungen durch die Unterbindung der Schwefelwasserstoffemissionen über den Kanaldeckel verhindert werden. Dies bedeutet aber auch, dass der Bereich unterhalb der Einbauebene vor korrosiven Angriffen zu schützen ist. Auch kann es in seltenen Einzelfällen über die Hausanschlüsse zu einer Rückströmung von belasteter Luft in die Hausanschlusschächte kommen. Dies ist durch den Einbau von Geruchsverschlüssen für die Hausanschlüsse vermeidbar.

## 6. Moderne Abluftbehandlung an zwei Beispielen

### 6.1 Beispiel Pumpwerk

Pumpwerke sind zentrale Elemente der Entwässerungssysteme und sind häufig durch Schwefelwasserstoffemissionen belastet. Damit einhergehen dann häufig Schädigungen an der Bausubstanz und der maschinentechnischen Ausrüstung.

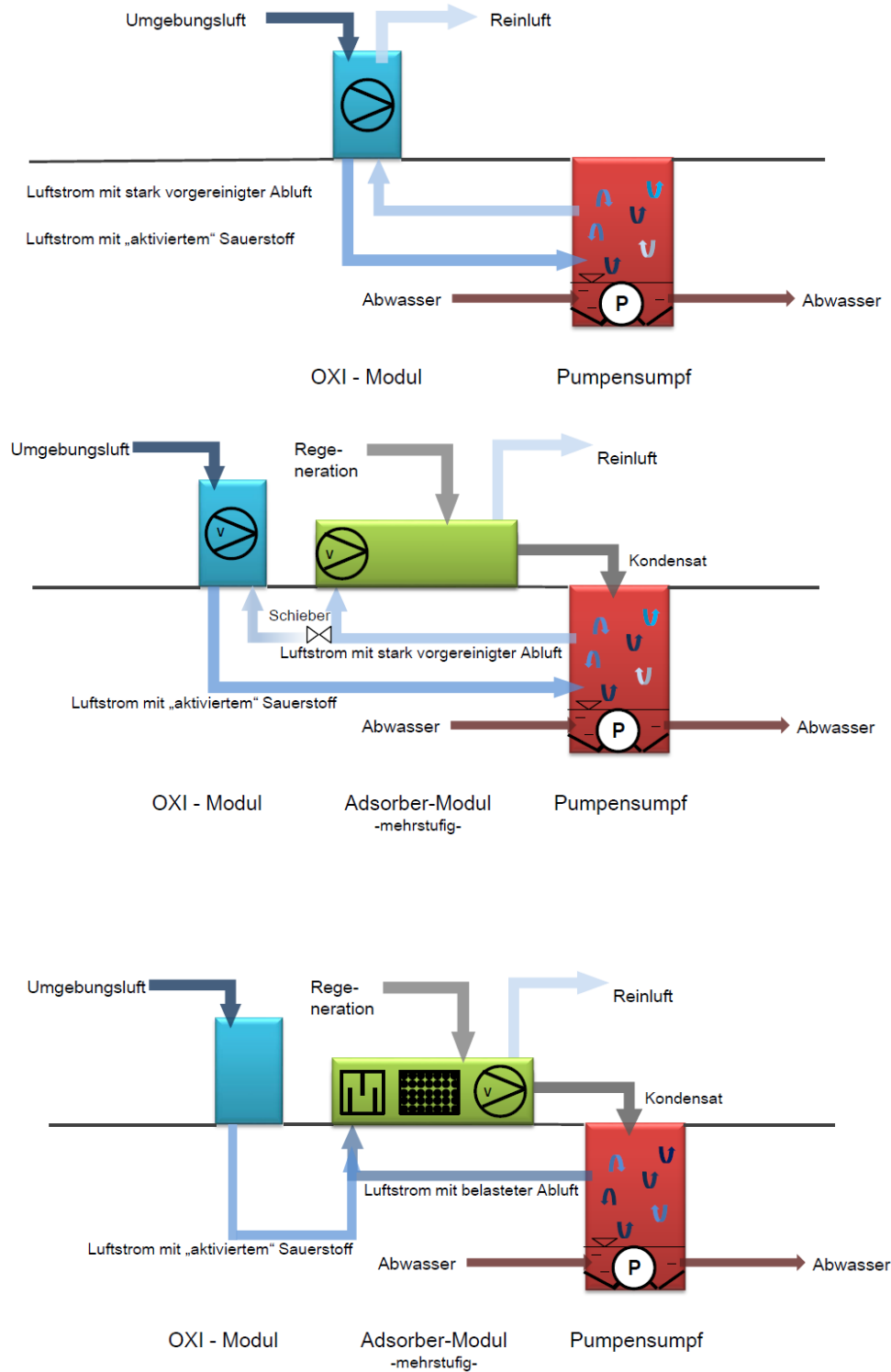
Zu den Schwefelwasserstoffbelastungen kommt es meist dadurch, dass oberstromige Sulfidbelastungen auf dem Fließweg nicht komplett emittiert werden und Restbelastungen ins nachfolgende Pumpwerk gelangen (vgl. Punkt 2). Gerade bei längeren Überleitungen finden sich auch Konstellationen, bei denen Druckrohrleitungen direkt auf ein Pumpwerk aufbinden, welches das Abwasser zum nächsten weiter befördert („Pumpwerksketten“). Damit verbunden sind sehr hohe Emissionen an den Pumpwerken selbst, bei denen mehrere hundert ppm keine Seltenheit sind, und

welche dadurch einem hohen korrosiven Angriff ausgesetzt sind. Zudem bildet sich auch in den Pumpwerken selbst Sulfid, da auch hier häufig anaerobe Zonen vorliegen (vgl. Punkt 2).

Die Behandlung der Abluft an diesen Punkten ist aus mehreren Gesichtspunkten zwingend erforderlich. Zum einen geht es um die Geruchsfreiheit der Anlagen inkl. Personenschutz, zum anderen sollte das Ziel der Abluftbehandlung auch sein, die Luftfeuchtigkeit im Pumpwerk zu reduzieren und durch trockene Oberflächen Korrosion zu unterbinden.

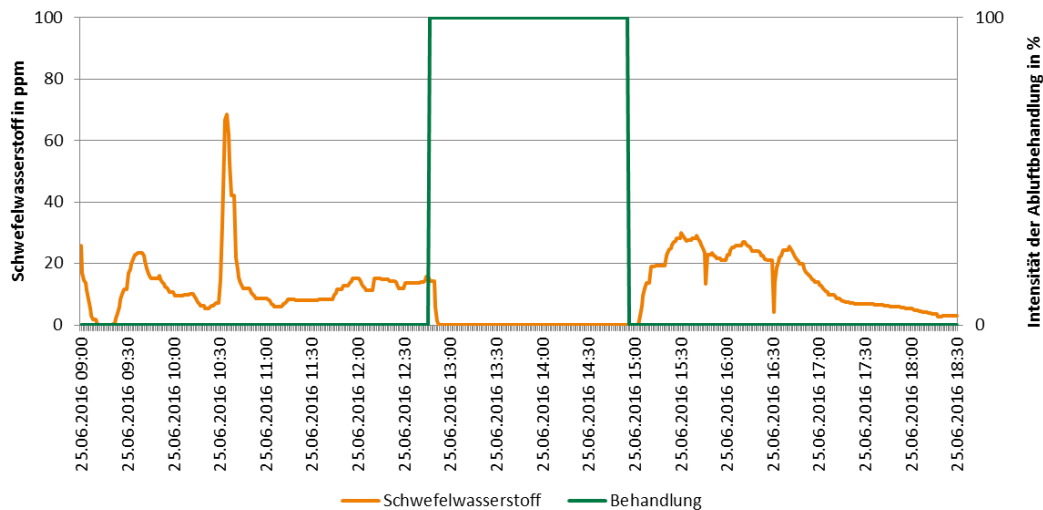
Hier bietet sich bei der Abluftbehandlung der Einsatz von aktiviertem Sauerstoff an. Das Grundprinzip des Verfahrens ist dabei der Natur abgeschaut. In der Atmosphäre entstehen durch die Einwirkung von UV-Licht reaktive Sauerstoffverbindungen. Diese werden durch Ionisation von Luftsauerstoff gebildet, haben ein sehr hohes Oxidationspotential und oxidieren daher unmittelbar alle Luftschadstoffe - darunter auch Schwefelwasserstoff. Dieser natürliche Prozess kann technisch nachgebildet werden. In der Oxidationseinheit befindet sich z. B. eine UV-Lampe einer spezifischen Wellenlänge. Die angesaugte Frischluft wird an der Lampe vorbeigeleitet und dabei wird der Luftsauerstoff ionisiert, man spricht hier auch von „aktiviert“. Dieser aktivierte Sauerstoff hat nun das Potential, die vorhandenen Geruchsstoffe (Osmogene) zu oxidieren. Entstehen durch diese „Spaltung“ neue Geruchsstoffe, sogenannte sekundäre Osmogene, so werden diese weiter oxidiert, bis nur noch reaktionsträge Endprodukte vorliegen, welche kein Gefährdungspotential hinsichtlich der Emissionen darstellen.

Zur Umsetzung dieses Prinzips gibt es mehrere grundsätzliche Verfahrensansätze. Damit die beschriebenen Prozesse vollständig ablaufen können, wird ein Reaktionsraum benötigt. Hierfür kann der vorhandene Pumpensumpf direkt genutzt werden. Dazu wird das Oxidationsmittel dann direkt in den Pumpensumpf geleitet. Alternativ kann auch die Abluft abgesaugt und in einem externen Reaktionsraum behandelt werden. Natürlich sind auch Kombinationen aus diesen Ansätzen denkbar (vgl. Abbildung 7).



**Abbildung 7: Darstellung möglicher Verfahrensweisen zur Behandlung von Abluft an Pumpwerken (hier am Beispiel nass aufgestellter Pumpen) – im Saug- oder Druckbetrieb**

Neben der wirtschaftlichen Betriebsweise mit geringem Betreuungsaufwand, haben Anlagen dieses Typs vor allem den Vorteil, dass das Verfahrensprinzip sofort wirkt. Wie Abbildung 8 zeigt, erfolgt nahezu unmittelbar nach dem Einschalten die Reduktion des Schwefelwasserstoffs am Pumpwerk. Damit eine derartige Funktionalität gewährleistet werden kann, ist es jedoch unabdingbar, die wesentlichen Auslegungsgrößen für die Anlagen im Vorfeld zu kennen. Hierfür sind bei Pumpwerken Betrachtungen, wie in Punkt 4 dargestellt, notwendig.



**Abbildung 8: Wirkungsweise der Zugabe von aktiviertem Sauerstoff in den Pumpwerksraum**

## 6.2 Beispiel Schiffsabwässer

Im Hafen der Stadt Kiel geben die großen Kreuzfahrtschiffe regelmäßig das gesammelte Grauwasser ab. Bedingt durch das Inkrafttreten der EntschlieÙung MEPC.200(62) [8] ist die Ostsee ab dem 01.01.2013 das erste Sondergebiet nach Anlage IV des MARPOL-Übereinkommens [9] für die Einleitung von Schiffsabwässern, wodurch eine deutliche Zunahme der Schiffswasserabgaben in naher Zukunft im Hafen zu erwarten sein wird. Der Hafen gibt das Grauwasser als Indirekteinleiter in das Entwässerungsnetz der Stadt ab. Im Zuge einer weitreichenden Änderung der Leitungsführung und Anpassung der Abwasseranlagen an die neuen Herausforderungen wurden Voruntersuchungen durchgeführt. Diese Simulationen und Probenahmen ergaben, dass sich bei ausgewählten Abwasserqualitäten der Kreuzfahrtschiffe Geruchsprobleme im Bereich der Einleitung ergeben könnten. Es wurde entschieden, dem durch eine Abwasserbehandlungsanlage, welche gezielt auf die Geruchsthematik abgestimmt wird, entgegen zu wirken.

Probleme bereiten dabei vor allem die Parameter pH-Wert und Sulfid (siehe Abbildung 9). Da bereits Sulfidkonzentrationen von deutlich weniger als 2 mg/l zu Belastungen in der Abluft im deutlich wahrnehmbaren Bereich führen können, wird eine Reduktion der Sulfidbelastungen deutlich unter dem genannten Grenzwert durch die Abwasserbehandlung angestrebt.

Parameter	Grenzwerte	Schiffsabwässer	Handlungsbedarf
pH-Wert	6,5 – 10	4,7 - 6,3	pH-Wertanhebung
Sulfid	max. 2,0 mg/l	0,3 - 3,7 mg/l	Sulfidreduzierung
Temperatur	max. 35 °C	max. 27 °C	kein Handlungsbedarf

**Abbildung 9: Zusammenstellung der wichtigsten Parameter pH-Wert, Sulfidkonzentration und Temperatur im Vergleich zu den einzuhaltenden Grenzwerten und dem dadurch angezeigten Handlungsbedarf**

Nach Vorlage der Berechnungen und Analysen war klar, dass klassische Ansätze zur Bekämpfung von Problemen durch Schwefelwasserstoff hier nicht funktionieren oder unwirtschaftlich sind. Deshalb wurde ein Konzept entwickelt, das sich den Fakt zu Nutze macht, dass bei sehr niederen pH-Werten nahezu das gesamte Sulfid als leicht emittierbarer Schwefelwasserstoff vorliegt (vgl. Abbildung 2).

Durch Belüftung der Schiffsabwässer kann der vorhandene Schwefelwasserstoff schnell ausgestrippt werden. Dadurch wird die Abluft mit der ausgestrippten Fracht beladen. Bei einer Belastung von 500 ppm und mehr wird dann eine sichere und wirtschaftliche Behandlung der Abluft notwendig. Die Funktionalität dieses Grundkonzepts wurde im Rahmen von Vorversuchen (siehe Abbildung 10) nachgewiesen und gleichzeitig wurden zusätzliche Parameter für die Bemessung sowohl der Abwasserbehandlungsanlage als auch der Abluftbehandlungsanlage dabei gewonnen.

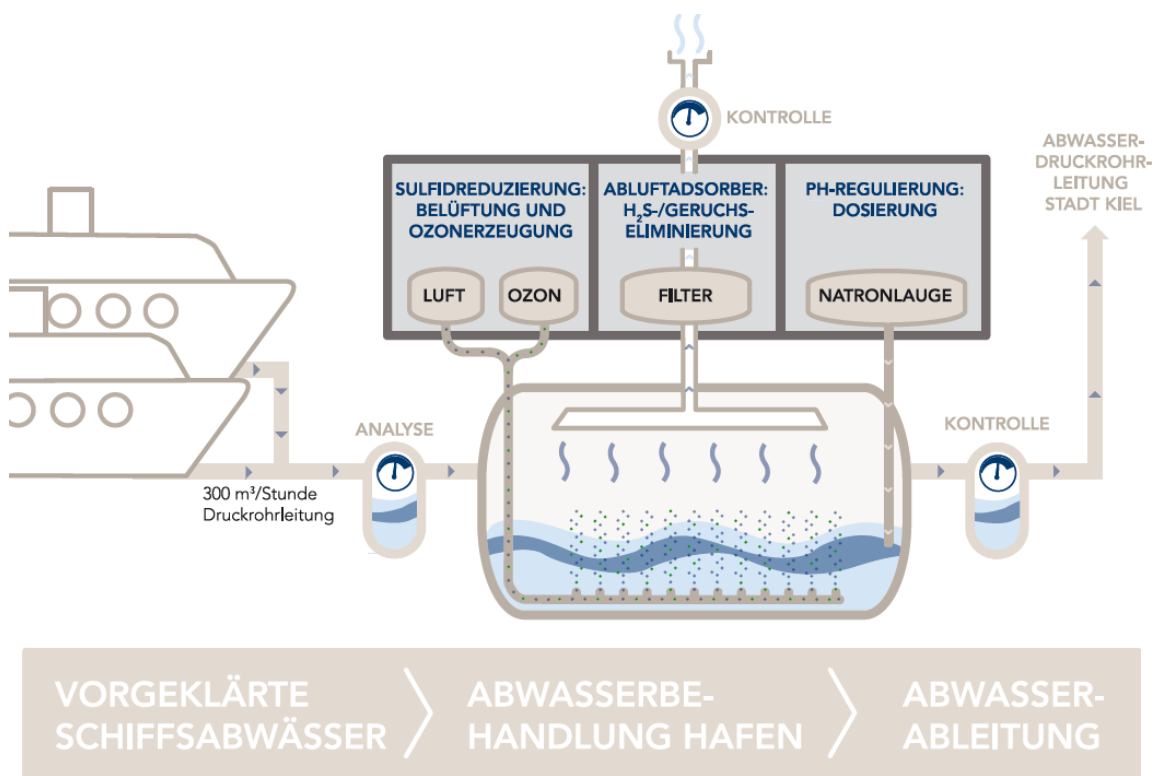


**Abbildung 10: Vorversuche zur Abluftbehandlung am Seehafen Kiel**

Darauf aufbauend wurde ein 75 m<sup>3</sup> großer Stauraumkanal aus Steinzeugrohren errichtet, der über ein Druckleitungssystem direkt durch die Kreuzfahrtschiffe beschickt wird. Dieser ist mit grobblasigen Belüftungselementen und umfangreicher Analysetechnik ausgestattet. Die Belüftung erfolgt dabei direkt durch Luft, welche mit Ozon angereichert ist, um einen weitest gehenden Abbau des ausgestrippten Schwefelwasserstoffs im Reaktor zu gewährleisten (vgl. Erläuterung Punkt 5.1). Restbelastungen an Schwefelwasserstoff werden in einer nachgeschalteten Adsorbereinheit zurückgehalten, so dass über den Schornstein, welcher über der zu den Schiffen führenden Passagiergangway liegt, gereinigte und „geruchsfreie“ Reinluft abgeführt wird (vgl. Verfahrensschema Abbildung 11). Die komplette Anlagentechnik ist kompakt in einem 40 Fuß Schiffscontainer untergebracht und integriert sich dadurch in das Hafenbild.

Das behandelte Grauwasser wird anschließend über eine Druckrohrleitung zum kommunalen Übergabepunkt gepumpt und dem städtischen Klärwerk zugeführt.

Die frühzeitige Einbindung von Berechnungen und Simulationen in die Ausarbeitung machte es möglich, weit vor der Umsetzung, die Auswirkungen von Planungsalternativen konkret zu benennen und eine kompakte, wirtschaftliche und sichere Lösung zu entwickeln.



**Abbildung 11: Verfahrensschema zur Behandlung von Grauwasser der Kreuzfahrtschiffe inkl. Abluftbehandlung**

## 7. Fazit

Schwefelwasserstoff ist ein Gefahrstoff, welcher in geringen Konzentrationen vorwiegend als unangenehmer Geruch auffällt, bei höheren Konzentrationen jedoch Gesundheitsrisiken birgt und in Extremfällen tödlich sein kann.

Gleichzeitig ist die Bildung von Schwefelwasserstoff in Entwässerungssystemen, bedingt durch bio-chemische Prozesse, nahezu unvermeidlich. Dies führt dazu, dass wir nicht nur bei direkten Einleitungen, sondern auch verteilt in den Entwässerungsnetzen und auf den Abwasserbehandlungsanlagen mit Schwefelwasserstoffbelastungen rechnen müssen. Dort können dann, bedingt durch biogene Korrosion, starke Schädigung an den Einbauten und der Bausubstanz auftreten.

Es gibt eine Vielzahl von Lösungen, um Schwefelwasserstoffbelastungen vorzubeugen. Dabei gibt es nicht DIE Maßnahmen, sondern es ist jeweils eine Einzelfallbetrachtung zur Findung der optimalen Lösung notwendig. Allen Ansätzen aber ist gemein, dass für die Bemessung Erfahrung und Annahmen nicht ausreichend sind, um eine wirtschaftlich und technisch optimierte Lösung zu erarbeiten und umzusetzen. Dies geht am effektivsten auf Basis einer GIS-basierten Modellierung der bio-chemischen Stoffumwandlungsprozesse, welche im Programm SULFIDUS skalierbar (von einzelnen Leitungen bis zu ganzen städtischen Entwässerungsnetzen) möglich ist. Damit können zum einen flächendeckende Aussagen zu Belastungen getroffen werden und zum anderen ist die Entwicklung von ganzheitlichen Geruchminimierungskonzepten möglich.

Mit Hilfe solcher Werkzeuge wird es auch möglich, moderne Abluftbehandlungsanlagen sicher zu bemessen und optimiert auf die Belastungen, z. B. an Pumpwerken, auszulegen. Darauf aufbauend können auch, ggf. ergänzt um wissenschaftlich-technische Untersuchungen, Konzepte entwickelt werden, welche weit über Standardlösungen hinausgehen und auf spezifische Anforderungen, wie z. B. die Abwässer und die Abluft der Grauwasserabgabe von Kreuzfahrtschiffen in Häfen, maßgeschneidert sind.

### Literatur:

- [1] TU München, 2015 Nachweis und Analyse biogener Schwefelsäurekorrosion in Abwasseranlagen, <http://www.sww.bgu.tum.de/forschung/mikrobiologische-systeme/biogeneschwefelsaeure-korrosion/>, Download am 06.02.2015
- [2] Schmidt, Bohatsch, 2014 Erfolgsstrategie gegen Geruch und Korrosion im Kanalnetz der Städtischen Betriebe Minden, KA 04/2014
- [3] Matsché et al. Korrosions- und Geruchsprobleme in Abwasserdruckleitungen (KUGPIA), Herausgeber Lebensministerium Wien, [http://www.publicconsulting.at/uploads/korrosions\\_und\\_geruchsprobleme\\_in\\_abwasserdruckleitungen.pdf](http://www.publicconsulting.at/uploads/korrosions_und_geruchsprobleme_in_abwasserdruckleitungen.pdf)
- [4] Weismann, Lohse, 2007 Sulfid.Praxishandbuch der Abwassertechnik, Vulkan Verlag 2007, ISBN 978-3-8027-2845-7



- [5] Pflaumbaum W.; Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) – IFA-Report 1/2016 Gefahrstoffliste 2016 – Gefahrstoffe am Arbeitsplatz; Rheinbreitbach 11/2016; ISBN 978-3-86423-178-0
- [6] Anonym; Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV); Art. 1 V. v. 26.11.2010 BGBl. I S. 1644 (Nr. 59); zuletzt geändert durch Artikel 148 G. v. 29.03.2017 BGBl. I S. 626
- [7] Frey, M. (2008). Untersuchungen zur Sulfidbildung und zur Effizienz der Geruchsminimierung durch Zugabe von Additiven in Abwasserkanalisationen . Kassel: Universität Kassel.
- [8] Anonym, RESOLUTION MEPC.200(62) – ANNEX 12; AMENDMENTS TO THE ANNEX OF THE PROTOCOL OF 1978 RELATING TO THE INTERNATIONAL CONVENTION FOR THE PREVENTION OF POLLUTION FROM SHIPS, 1973 (Special Area Provisions and the Designation of the Baltic Sea as a Special Area under MARPOL Annex IV)
- [9] Anonym, MARPOL 73/78, International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 as modified by the Protocol of 1978

Autoren:

Dipl.-Ing. (Univ.), Dipl. Umweltwiss. Andreas Obermayer

M. Sc. Sebastian Maroß

Dipl.-Wirt.-Ing. Klaus Jilg

UNITECHNICS KG

WERKSTRASSE 717

D-19053 SCHWERIN

Kontakt:

Tel.: 0385 / 343371-20

E-Mail: [a.obermayer@unitechnics.de](mailto:a.obermayer@unitechnics.de)