

LENA



Landesenergieagentur Sachsen-Anhalt GmbH

Wir machen Energiegewinner.

WIR MACHEN ENERGIEGEWINNER



ABWASSERBEHANDLUNG IN SACHSEN-ANHALT – ENERGIEEFFIZIENZ STEIGERN

Kombinierte Verfahrens- und Energieeffizienzanalyse mit einem Digitalen Zwilling

DEUTSCHLAND
MACHT'S
EFFIZIENT.

INHALT

MOTIVATION	3
MECHANISMEN ZUR ENERGIEEINSPARUNG	4
Überblick	4
Belüftungssysteme	5
Verfahrensregler (Regelung der Stickstoffelimination)	7
INTEGRIERTE PLANUNG MIT SIMULATION	8
Computermodell Verfahrenstechnik	8
Virtuelle Erprobung von MSR-Funktionen	9
Simulation der Ausrüstung und des Energiebedarfs	10
BEISPIEL: ÜBERPRÜFUNG ENERGIEEFFIZIENTER LUFTVERTEILREGELUNG BEI DRUCKBELÜFTUNG	14
Problemstellung	14
Varianten	14
Digitales Modell	15
Ergebnisse	15
ZUSAMMENFASSUNG	18
Quellen	19



MOTIVATION

Anbetrachts der steigenden Anforderungen an einen wirtschaftlichen Betrieb rückt das Thema Energieeffizienz auch auf Kläranlagen zunehmend in den Fokus des wirtschaftlichen Handelns.

Mit Hilfe von Energieanalysen sollen Energieeinsparpotenziale aufgedeckt werden, wobei jedoch die Sicherstellung der Wasserreinigung gemäß der Abwasserverordnung stets oberste Priorität hat. Eine Grundlage für die energetische Einordnung einer Kläranlage bildet das Arbeitsblatt DWA-A 216 – Energiecheck und Energieanalyse [DWA 2016] oder auch Landesinitiativen wie z. B. [Müller et al. 1999].

Auf Kläranlagen ist interessantes Verbesserungspotenzial durch steuerungs- und regelungstechnische Maßnahmen und maschinentechnische Anpassungen, trotz der bei den biologischen Prozessen einer Kläranlage gegebenen Einschränkungen, vorhanden. Dieses Potenzial kann zur Verbesserung der Ablaufwerte und des Energieeinsatzes genutzt werden.

Die optimale Hebung dieses Potenzials ist allerdings eine herausfordernde interdisziplinäre Ingenieursaufgabe. Bei Gewährleistung, besser noch Verbesserung, der verfahrenstechnischen Funktion der Kläranlage als Aufgabe für den Verfahreningenieur (Siedlungswasserwirtschaftler) muss eine abgestimmte Maschinentechnik (Pumpenstaffeln, Belüfterele-

mente, Belegungsdichte, Luftverteilsystem, Gebläsestaffel, Schieberauslegung) installiert werden, um die Anforderungen mit hohem Wirkungsgrad umsetzen zu können, und letztlich muss eine darauf abgestimmte Automatisierungstechnik mit Hilfe der Ausrüstung das Verfahren stabil, schnell und lastabhängig in den jeweils besten Arbeitspunkten halten.

Ein leistungsfähiges Werkzeug für die Planung, Dimensionierung und den Betrieb von Kläranlagen ist die Nutzung von Simulationen. Mit dieser Methode wird ein „digitaler Zwilling“ als Computermodell erstellt, welches alle relevanten Komponenten enthält (Abbildung 1). In diesem Computermodell werden alle Interaktionen innerhalb der Kläranlage virtuell analysiert und optimiert.

Der Vorteil einer Analyse von Energieverbräuchen unter Zuhilfenahme der Simulation liegt in der dynamischen Abbildung der verfahrenstechnischen Prozesse.

Veränderungen in den Randbedingungen sowie der Prozessführung werden simuliert und damit Konzepte zur Verbesserung der Reinigungsleistung oder Verringerung des Energieverbrauchs entwickelt. Dies stellt einen maßgeblichen Vorteil im Vergleich zur statischen Bilanzierung ausschließlich anhand von Betriebswerten einer Kläranlage dar.

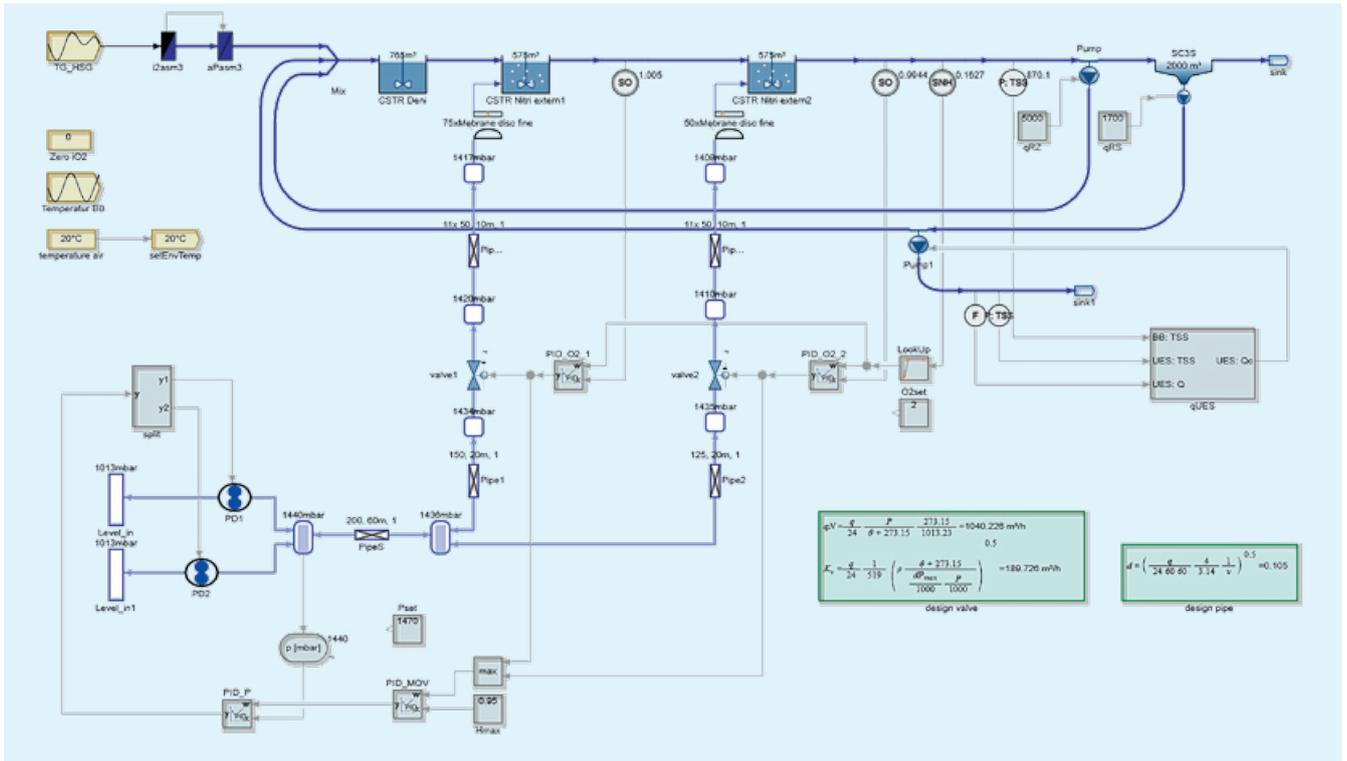


Abbildung 1: Modell einer Kläranlage mit Belüftungssystem und MSR-Technik

MECHANISMEN ZUR ENERGIEEINSPARUNG

ÜBERBLICK

In Abbildung 2 ist die im Abwasser chemisch, thermisch und mechanisch gebundene Energie dargestellt. Verfolgt man das Schicksal der chemisch oxidierbaren Stoffe in einer Kläranlage (Siehe auch Abbildung 3), ist festzustellen, dass ein großer Anteil oxidiert wird (mit Sauerstoff oder Nitrat). Der Anteil, der mit Sauerstoff oxidiert wird, generiert den hauptsächlichen Energiebedarf einer Kläranlage.

Im Gegensatz dazu kann der Anteil, der letztlich als Klärgas vorliegt, als Energiequelle genutzt werden (thermisch und elektrisch). Als Ansatz zur verfahrenstechnischen Optimierung aber auch zur Planung von Automatisierungskonzepten, die den Energiebedarf minimieren sollen, bieten sich daher folgende Möglichkeiten an:

Effiziente Sauerstoffversorgung:

Energiebedarf für die Bereitstellung des benötigten Sauerstoffs minimieren.

- Maximierung Wirkungsgrad Druckluftherzeugung
- Minimierung des Sauerstoffüberschusses (großer Abstand von der O₂-Sättigung).

Maximierung Eigenversorgung:

Anteil des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB), der als Klärgas verfügbar wird, vergrößern, wobei gleichzeitig der zu oxidierende Anteil verringert wird. Dies kann erfolgen durch:

- optimale Nutzung der Vorklärung und
- durch eine Schlammalter-Regelung.

Maximierung Denitrifikation:

Anteil des aerob oxidierten CSBs zu Gunsten des anoxisch oxidierten CSBs verringern, um eine maximale Denitrifikation zu erreichen.

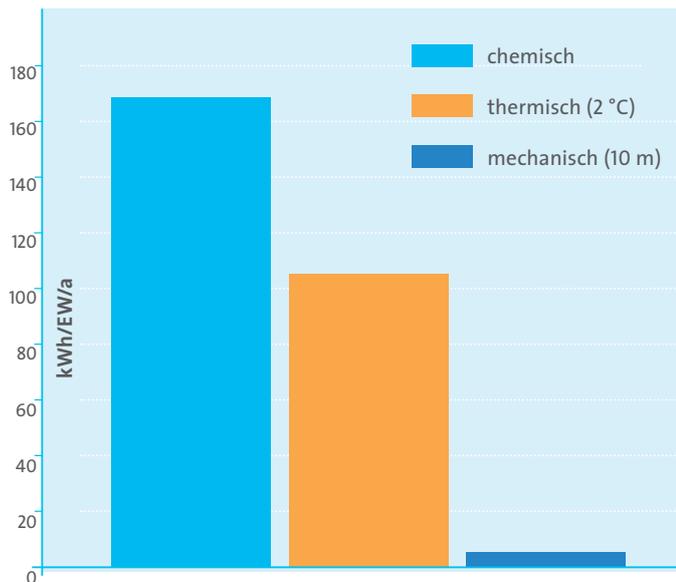


Abbildung 2: Energiegehalt von Abwasser in Kilowattstunden

Fast alle diese Maßnahmen können im Betrieb durch geeignete Automatisierungsfunktionen unterstützt werden [DWA 2015]. Neben dem Energieaufwand zur Sauerstoffversorgung wird Energie auch zur Förderung von Abwasser und Belebtschlamm sowie deren Vermischung benötigt. Des Weiteren muss auch zur Verhinderung des Absetzens von Schlamm in Belebungsbecken (Anaerob-Becken, Denitrifikationsbecken, gegebenenfalls auch in Nitrifikations-

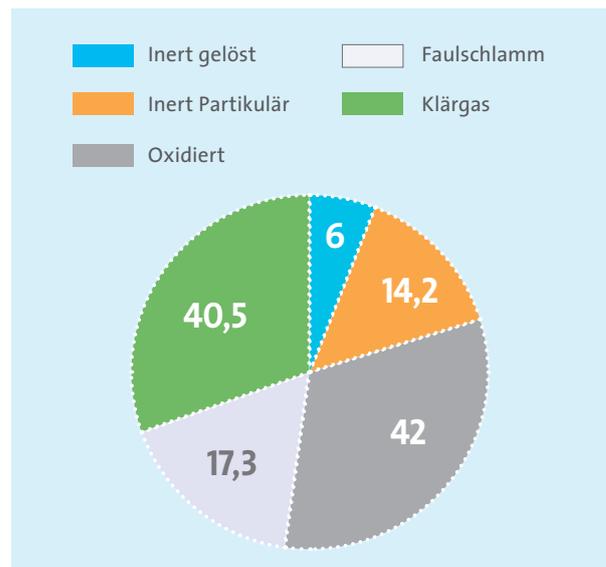


Abbildung 3: Chemisch gebundener Energiegehalt von Abwasser in Prozent

becken bei geringer Belüftungsintensität) mechanische Energie aufgewendet werden.

i Eine optimal auf die Bedürfnisse der Anlage dimensionierte Pumpenstaffel und eine Wirkungsgrad orientierte Betriebsweise sind oftmals der Schlüssel zur Hebung von Energieeffizienzpotenzialen.

BELÜFTUNGSSYSTEME

Für einen wirtschaftlichen Betrieb von Belebungsanlagen sind die Auslegung und Betriebsweise der Belüftungseinrichtungen von zentraler Bedeutung. Das Gesamtpotenzial aller Maßnahmen zur Erhöhung der Effektivität der Belüftung liegt - abhängig vom Ausgangszustand der Anlage - in der Größenordnung von 10-20 Prozent. Neben Beckenvolumen, die ständig belüftet sind, werden häufig zeitweise belüftete Becken eingebunden, um die jeweils erforderlichen aeroben oder anoxischen Bereiche für die Nitrifikation und Denitrifikation zu schaffen.

Über die Belüftungseinrichtungen ist der aktuell vorhandene Sauerstoffbedarf der Biologie einzubringen, wobei in Abhängigkeit von der Abwasserbelastung, von der Temperatur, von der Betriebsweise und von weiteren Einflussfaktoren der Sauerstoffbedarf im Tages-, Wochen- und Jahresgang stark schwankt.

Ein zu hoher Sauerstoffeintrag ist sowohl aus verfahrenstechnischen als auch wirtschaftlichen Gründen zu vermeiden. Die Automatisierung der Sauerstoffversorgung muss neben dem zeitlich schwankenden Sauerstoffbedarf auch die örtliche Verteilung berücksichtigen.

Wichtige Fragestellungen, die für die verfahrenstechnische Funktion von Sauerstoffregelungen aber auch für den Energiebedarf relevant sind:

- Anzahl, Messort von Sauerstoffsonden, Wahl der Regelgröße,
- Anzahl und Stellbereich von Luftzuleitungen zu Beckenkaskaden,
- Belegungsdichte der Belüfter in den jeweiligen Beckenabschnitten,
- Vorgabe geeigneter Sauerstoffsollwertprofile (örtliche Verteilung).



Abbildung 4: Belebungsbecken mit Luftleitungen

Das Belüftungssystem bei Anlagen mit Druckluftbelüftung besteht aus den Gebläsen oder Verdichtern (Drehkolbengebläsen, Turboverdichtern), dem Luftverteilungssystem mit Hauptleitungen, Unterverteilungen und Drosselorganen (Klappen, Regelschiebern) und den Eintragungssystemen (z. B. Membranbelüftern). Mit Ausnahme von sehr kleinen Anlagen haben Belebungsanlagen mehrere Belüfterfelder, die entweder direkt an ein Gebläse bzw. einen Verdichter oder an eine Sammelleitung angeschlossen sind und einzeln geregelt werden. Als Regelgröße dienen dabei meistens der Sauerstoffgehalt im Becken oder der Ammoniumgehalt im Ablauf der Anlage. Die Stellgröße ist bei direkter Zuordnung der Gebläse zu einzelnen Beckenbereichen die Drehzahl der Gebläse oder bei Versorgung über eine Sammelleitung die Stellung der Regelschieber. Wird die Druckluft der einzelnen Beckenbereiche über eine Sammelleitung zur Verfügung gestellt, kann die Anzahl der in Betrieb befindlichen Gebläse und deren Drehzahl über die Regelgröße Druck in der Hauptverteilung geregelt werden.

Dabei ist das System energetisch optimiert, wenn jederzeit mindestens ein Regelschieber voll geöff-

net ist und das Sauerstoffniveau verfahrenstechnisch den Vorgaben entspricht.

Die Erarbeitung des entsprechenden Regulationssystems ist, auch im Hinblick auf die sehr unterschiedlichen Betriebszustände, eine komplexe Ingenieursaufgabe. Als effektives Arbeitsmittel können hierfür dynamische computergestützte Simulationsmodelle eingesetzt werden, die eine der Standardmethoden des Automatisierungsingenieurs zur Analyse und Synthese komplexerer Regulationssysteme sind. Ein typischer Vergleich ist die Gegenüberstellung einer konventionellen Kaskadenregelung und einer Kaskadenregelung mit Gleitdruckregelung.

Eine Gleitdruckregelung bietet insbesondere beim Einsatz von Drehkolbengebläsen die Möglichkeit, Spaltverluste durch die Minimierung des Druckes in der Sammelleitung zu reduzieren. Problematisch bei dieser Variante ist die weitere Verkomplizierung des Regulationssystems, wodurch weitere Wechselwirkungen entstehen. Damit wird die Einstellung und Inbetriebnahme des Systems erschwert.

VERFAHRENSREGLER (REGELUNG DER STICKSTOFFELIMINATION)

Basierend auf Gütemessungen können weitergehende Regelungskonzepte für die Stickstoffelimination eingesetzt werden, die neben der Verbesserung der Reinigungsleistung eine Reduktion des Energieverbrauchs zum Ziel haben.

Die Motivation für derartige Verfahrensregelungen liegt bei gering belasteten Anlagen in der

- optimalen Nutzung des existierenden Beckenvolumens,
- Maximierung der N-Elimination, Energieminimierung,
- sicheren Nitrifikation,
- Beherrschung von Lastspitzen,
- hohen mittleren Nitrifikationsleistung

und bei hoch belasteten Anlagen in der

- sicheren Einhaltung der Grenzwerte durch
- sichere Nitrifikation und
- Reduktion von Ablaufspitzen.

Wichtige Fragen, die sich vor der Einführung entsprechender Maßnahmen stellen, sind:

- Wie groß ist das mögliche Potenzial von Steuerungen und Regelungen bezüglich der Ablaufwerte und des Energieeinsatzes?
- Was ist notwendig, um vorhandenes Potenzial ausreichend zu nutzen?

Die Notwendigkeit dieser Hinterfragung ist die Tatsache, dass das verfahrenstechnische Optimierungspotenzial auf Kläranlagen nicht zuletzt durch die gesetzlichen Vorgaben zur Einhaltung der Ablaufwerte begrenzt ist. Das Leistungspotenzial wird letztlich durch Mikroorganismen bestimmt, wobei Schlammalter und die mittlere Zulaufkraft die maximale Leistung festlegen. Anpassungen sind nur begrenzt möglich, da die Dynamik der Mikroorganismenpopulation deutlich langsamer ist als der Tagesgang der Zulaufkraft. Der zu optimierende Energieeinsatz ist zudem eng gekoppelt mit der Reinigungsleistung und ergibt sich weitgehend aus einem stöchiometrisch fixierten Sauerstoffbedarf für Nitrifikation und Kohlenstoffelimination.

Um neben der Anpassung der Luftmenge an die jeweilige Last auch eine optimale Nutzung der Anlagenkapazität (Balance Nitrifikation/Denitrifikation) und eine Reduktion des Energiebedarfs für die Belüftung in lastschwachen Zeiten zu ermöglichen, wird häufig die Realisierung einer ammoniumgeführten Anpassung des Sollwertes der Sauerstoffregelung erwogen. Es wird hierzu die Ammoniumkonzentration am Ablauf der Belebung gemessen und über einen Regler der Sollwert der Sauerstoffkonzentration angepasst, sodass eine gewünschte, ausreichend niedrige Ammoniumkonzentration eingestellt wird.



Aus Sicht der Regelungstechnik wird ein derartiges Konstrukt als Kaskadenregelung bezeichnet.

Für einen derartigen Regler stellt sich u. a. die Frage, mit welchem Reglertyp die Anpassung des Sauerstoff-Sollwertes erfolgen sollte. In [Alex et al. 2017] wird z. B. demonstriert, dass z. B. ein P-Regler für diese Aufgabe geeignet ist.

Als Nachteil dieser Regelung kann unter Umständen das Zulassen einer nicht vollständigen Nitrifikation angesehen werden (mittlerer Ablaufwert von ca.

1 mg/l). Dies führt zu einem reduzierten Nitrifikantenwachstum. Teilweise ausgeglichen wird dies jedoch durch eine reduzierte Sterberate der Nitrifikanten bei reduzierter Belüftung. Das Energieoptimum des Anlagenbetriebs wird bei möglichst weitgehender Denitrifikation erreicht.

i Für typische Anlagen sind erfahrungsgemäß Einsparungen um die 10 - 15 Prozent bezüglich des Energiebedarfs für die Belüftung zu erwarten.

INTEGRIERTE PLANUNG MIT SIMULATION

COMPUTERMODELL VERFAHRENSTECHNIK

Wie einleitend dargestellt ist bei jeder Maßnahme zur Minimierung des Energieeinsatzes die verfahrenstechnische Funktion der Anlage zumindest sicherzustellen, wenn möglich zu verbessern. Die Auswirkung der unterschiedlichen möglichen Maßnahmen auf die Funktion (u. a. Ablaufwerte) der Anlage ist mit einfachen stationären Überlegungen meist nicht zu quantifizieren. Hier muss in der Regel mit dem Werkzeug der dynamischen Simulation gearbeitet werden, alternativ bleibt nur die Methode „Try and Error“ an der realen Anlage.

Für die Abbildung der biologischen Abbauprozesse liegen verlässliche und seit vielen Jahren bewährte Belebtschlammmodelle vor [Henze et al. 2000]. Für die vereinfachte Anwendung liegen mit [Ahnert et al. 2015] und [Alex et al. 2015] aktuelle Hinweise vor, die in der Hochschulgruppe „Simulation“ (HSGSim) entwickelt wurden. Des Weiteren besteht zur Beschreibung der Prozesse des Abbaus von Kohlenstoffverbindungen und des Abbaus von Stickstoff (Nitrifikation und Denitrifikation) mit dem ASM3 (Activated Sludge Model No. 3) eine verlässliche Modellgrundlage.

Dieses einfache Modell sollte für die meisten Fragestellungen, die im Zuge der energetischen Optimierung auftreten, verlässliche Antworten liefern. Falls die detaillierte Beschreibung der Prozesse der erweiterten biologischen Phosphorelimination

(P-Elimination) erforderlich wird, kann u. a. mit dem erweiterten ASM3 [Rieger 2006] gearbeitet werden. Ergänzt werden die Belebtschlammmodelle durch Modelle der Vorklärung, Nachklärung, Abwasser-





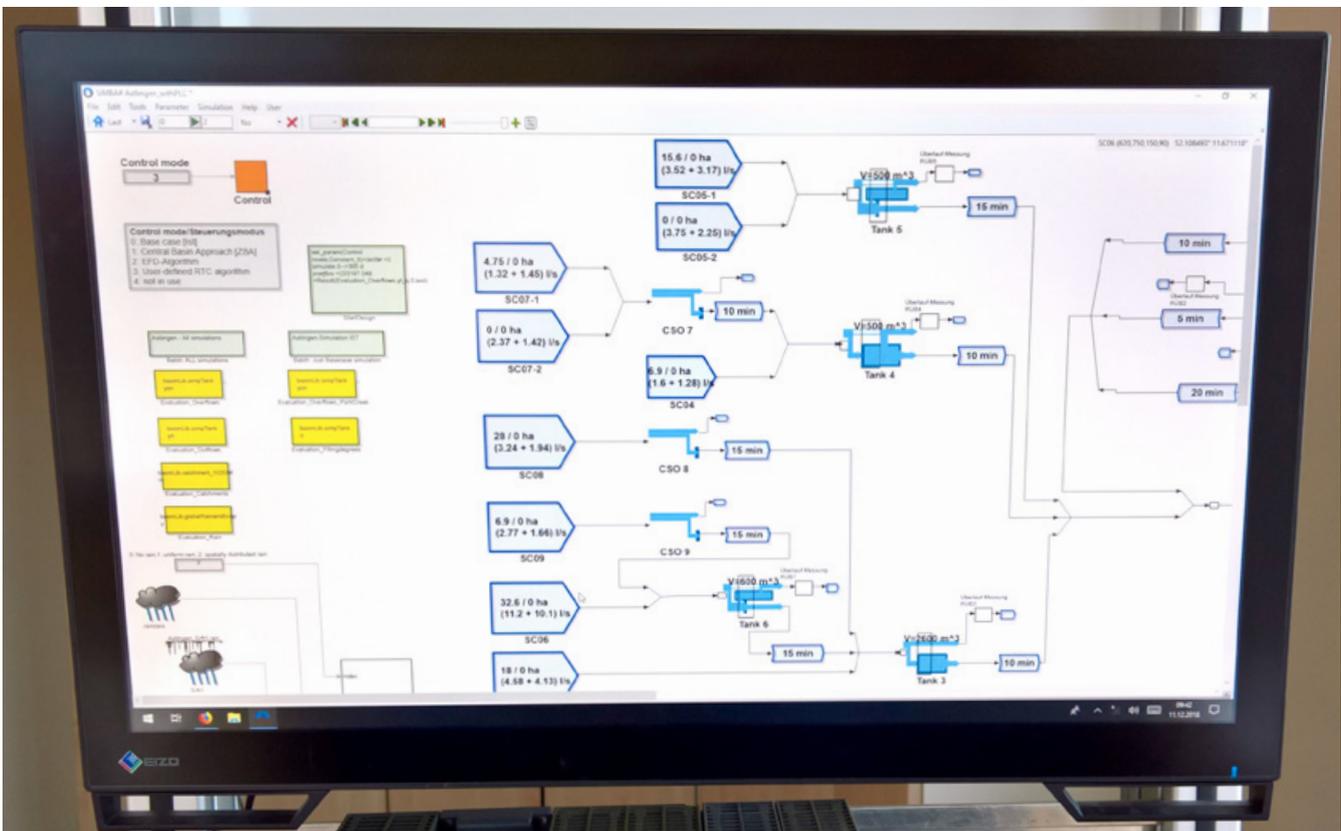
verteilung, Faulung etc., um die verfahrenstechnische Seite einer Kläranlage vollständig beschreiben zu können.

Simulationssoftware mit den erforderlichen Software-Modellbausteinen ist von verschiedenen Anbietern verfügbar. In Deutschland wird vorrangig mit SIMBA [Alex 2015] gearbeitet. Diese Software wird seit 1994 durch das gemeinnützige Forschungsinstitut ifak e.V. entwickelt (Mitautor dieser Broschüre).

VIRTUELLE ERPROBUNG VON MSR-FUNKTIONEN

Neben energetischen Kenngrößen können in einer virtuellen Umgebung Einstellungen der manuellen oder automatischen Betriebsführung simuliert und getestet werden. Um die Auswirkung dieser Maßnahmen in der Simulation beschreiben zu können, müssen automatisierungstechnische Funktionen im Computermodell abgebildet werden. Zur Beschreibung von Automatisierungsfunktionen müssen dem Anwender in einem „digitalen Zwilling“ entsprechende Standards der Automatisierungstechnik, wie z. B. MSR-Funktionen zur Verfügung stehen.

Die im digitalen Zwilling entwickelten und getesteten MSR-Funktionen können später als Quellcode zur Implementierung übergeben werden. Sie dienen dann entweder als eindeutige Funktionsbeschreibung oder der Code wird direkt in die SPS-Programmierungsumgebung übertragen. Mit einer entsprechenden Simulationsplattform, wie z. B. #SIMBA, lassen sich all diese Varianten virtuell erproben.



SIMULATION DER AUSRÜSTUNG UND DES ENERGIEBEDARFS

Zur Simulation des Verhaltens von Belüftungssystemen werden Computermodelle der entsprechenden Komponenten benötigt:

- Gebläse und Gebläsesteuerungen,
- Rohrleitungen mit typischen Einbauten,
- Regelventile (konventionell und Neuentwicklungen) und
- Belüfterelemente (Einrichtungen zum feinblasigen Eintrag von Luft in Belebungsbecken),

die untereinander oder aber in Verbindung mit einem verfahrenstechnischen Kläranlagenmodell verschaltet werden können. Mit einem entsprechenden Simulationssystem können

- Belüftungssysteme energieeffizienter gestaltet werden,
- häufige Planungsfehler, die zu ungünstigem Betriebsverhalten führen, vermieden werden
- künftig steigende Anforderungen an starke Lastschwankungen bei Extremregenereignissen (Anpassung an Klimawandel) besser erfüllt werden,
- Energiebezug flexibler gestaltet werden (Energie-Management, Teilnahme am Energiemarkt)
- sowie planerisch analysiert werden, wie Kläranlagen intelligenter reagieren (Industrie 4.0 Konzepte).

Eine besondere Rolle spielen detaillierte Modelle für Belüfter (Siehe Abbildung 5). Belüfter sind Einrich-

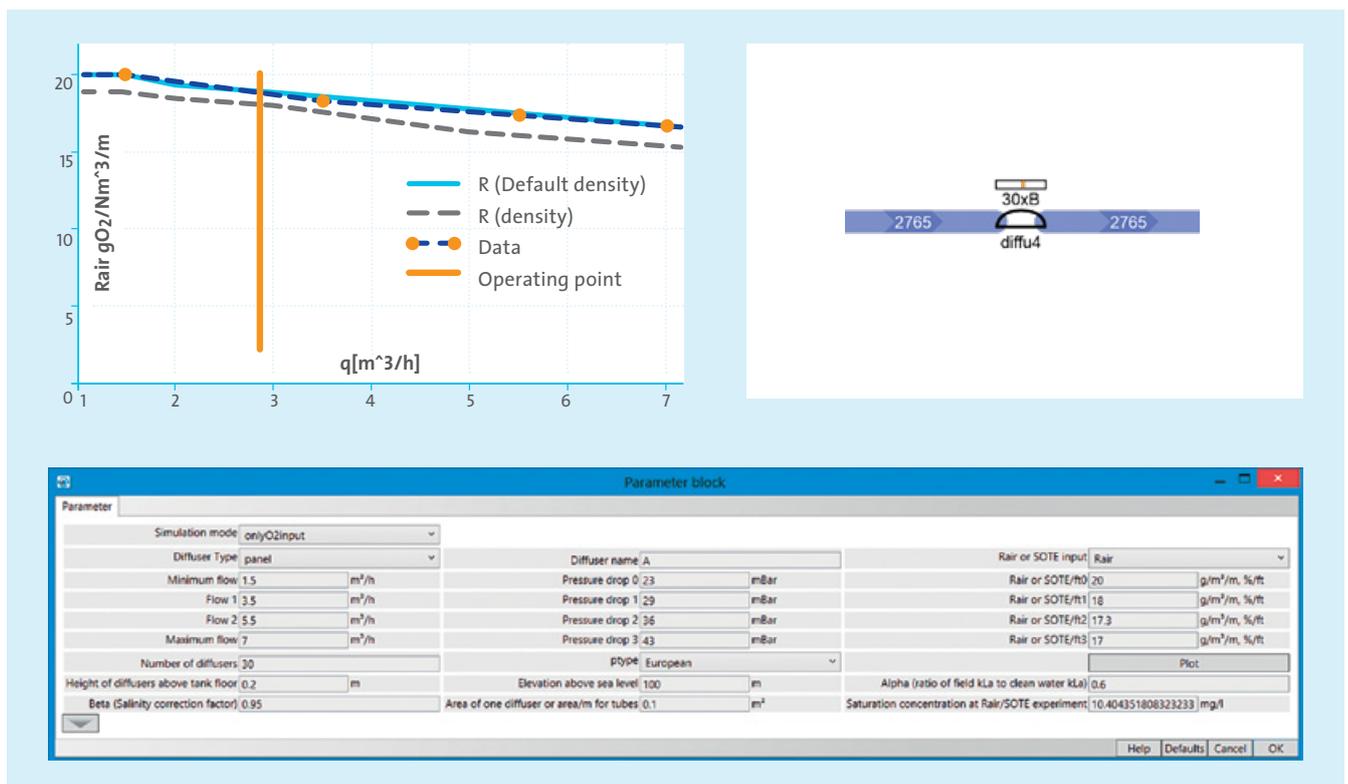


Abbildung 5: Dialogmaske eines detaillierten Belüftermodells

tungen zum feinblasigen Eintrag von Luft in Belebungsbecken (u. a. Membranbelüfter, Tellerbelüfter, Rohrbelüfter, Keramikkerzen). Die betrachteten Modelle beschreiben die

- Beschreibung des Druckabfalls bei unterschiedlicher Beaufschlagung,

- Beschreibung der Effizienz des Sauerstoffeintrages, abhängig von Modelltyp, Beaufschlagung, Belegungsdichte, Betriebsbedingungen, Aufstellungshöhe etc.

Das Modell des Sauerstoffeintrags muss die Belegungsdichte, den Salzgehalt, die Temperatur, den

Luftdruck, den Alpha-Wert, den Wasserstand und die aktuelle Sauerstoffkonzentration im Becken berücksichtigen. Für die Analyse des Energiebedarfs ist hier die detaillierte Berücksichtigung des Sauerstofftrags aus der eingetragenen Luft relevant.

Die Rohrleitungsmodelle beschreiben unter Nutzung von Gasgleichungen, der Luftfeuchte und der Temperatur den

- Druckabfall in Rohrleitungen (Reibungsverluste) und den
- Einfluss von Einbauten (Bögen, Armaturen etc.).

Um die Anpassung der Luftverteilung in verschiedene Stränge abzubilden, müssen unterschiedliche Bauformen von Stellventilen abgebildet werden können.

Zur Bereitstellung verdichteter Luft werden vorrangig Turboverdichter oder Drehkolbengebläse eingesetzt. Die erforderlichen Modelle beschreiben

- den Regelbereich,
- Wirkungsgrade,
- Energieverbrauch und
- Anlaufverhalten sowie kritische Betriebspunkte dieser Aggregate.

Um die Koordinierung einer Staffel von Gebläsen (bzw. auch einer Pumpenstaffel für die Abwasserförderung) zu beschreiben, werden optimierte Staf-felregler benötigt. Diese bieten:

- eine Optimierung des Wirkungsgrads,
- einen stetigen Regelbereich und
- eine Hysterese bei Konfigurationsumschaltung.

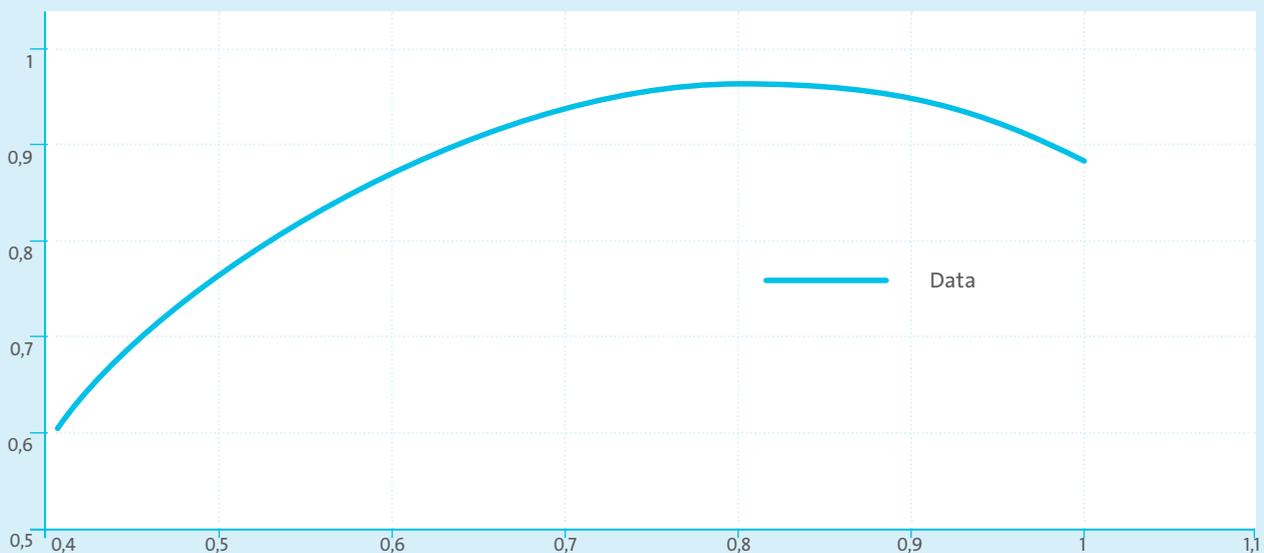
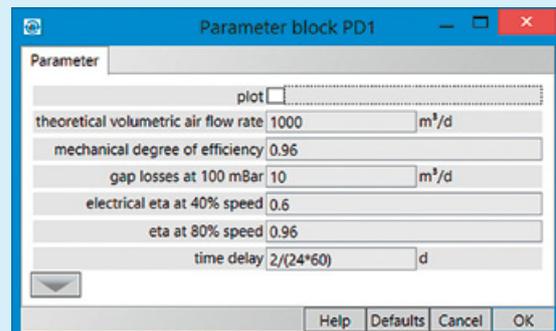
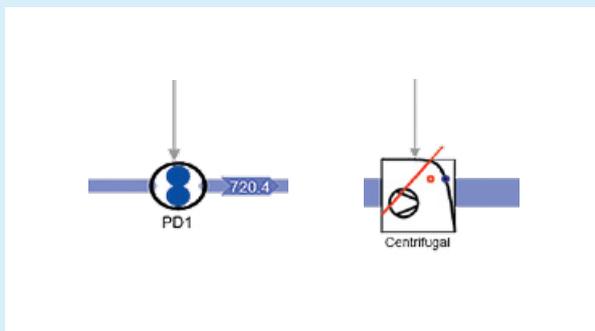
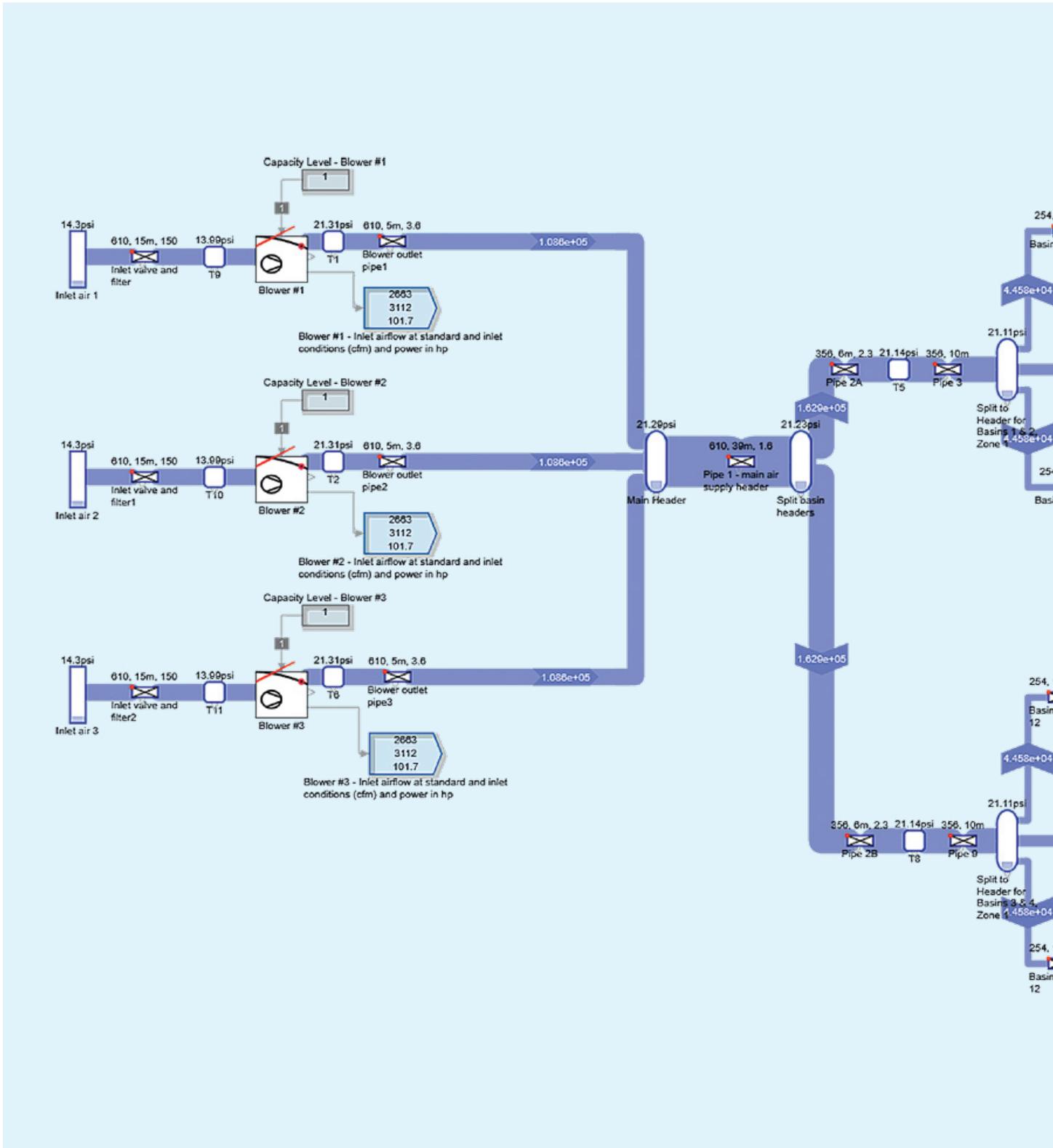


Abbildung 6: Modelle von Drehkolbengebläsen und Turboverdichtern



In Abbildung 7 ist ein Beispiel für den Entwurf eines Luftverteilsystems aus dem entsprechenden EPA Handbuch [EPA 1989] umgesetzt.

Zur Berechnung des Energiebedarfs bzw. der Effektivität von Pumpen ist neben der Pumpencharakteristik auch die Kenntnis der jeweiligen Förderhöhe unter Betriebsbedingungen erforderlich.

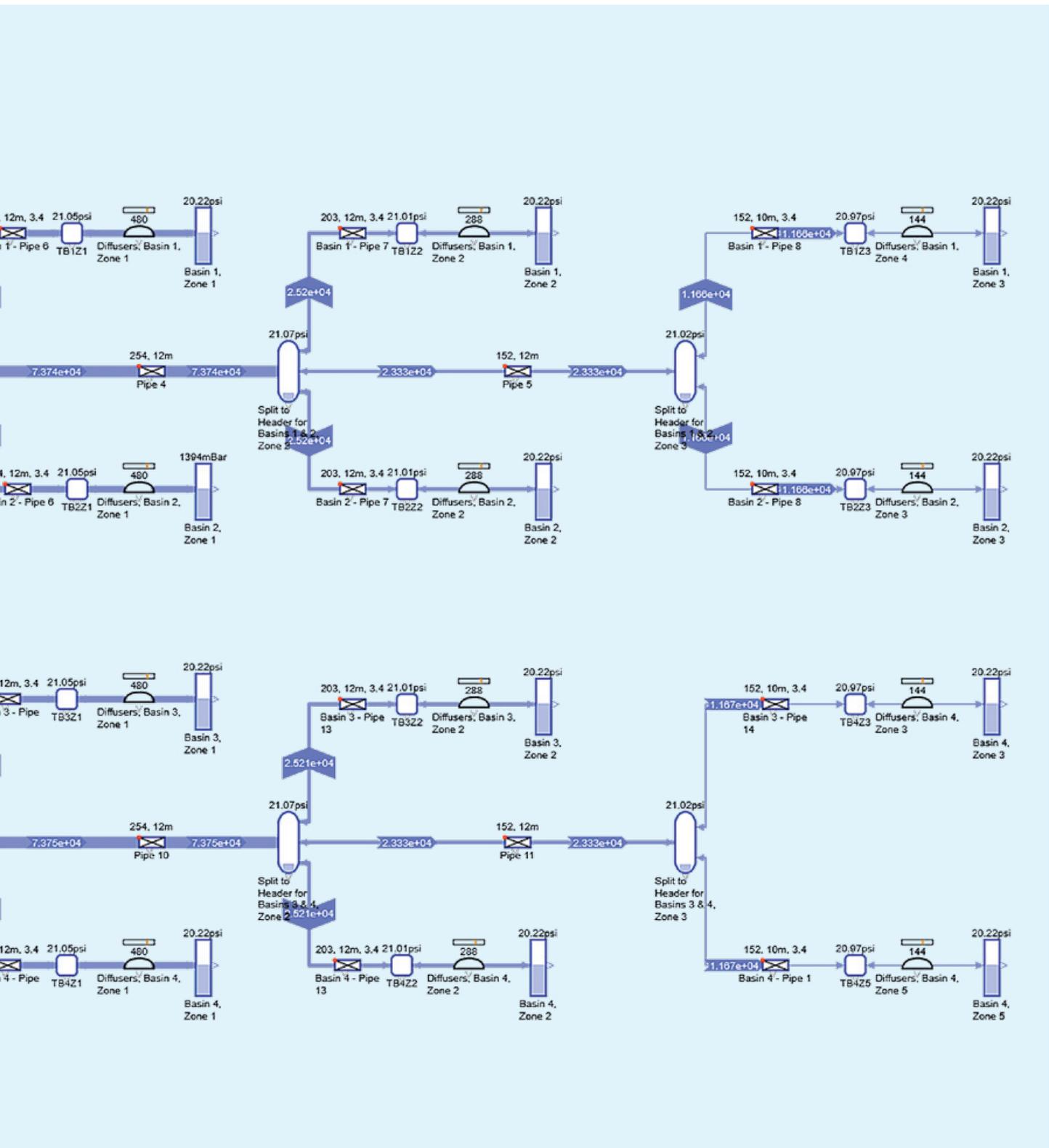


Abbildung 7: Modell eines Belüftungssystems

Um letztlich aus dem Energiebedarf auf die Kosten zu schließen, muss ein Modell der Tarifberechnung genutzt werden. Hier kommen dann Aspekte der Tageszeit, Spitzenbedarfsfaktoren, Strafbteile etc.

zum Tragen. Eine technisch vorteilhafte Lösung ist nicht automatisch gleichbedeutend mit einer kostenoptimalen Lösung.

BEISPIEL: ÜBERPRÜFUNG ENERGIEEFFIZIENTER LUFTVERTEILREGELUNGEN BEI DRUCKBELÜFTUNG

PROBLEMSTELLUNG

Mit den zuvor beschriebenen Werkzeugen können vielfältige verfahrenstechnische Fragestellungen, Details der maschinentechnischen Ausrüstung, effektive Regelungskonzepte und Energieeinsparpotenziale analysiert werden. Ein interessantes Detail ist hier beispielsweise die Struktur des Regulationssystems zur Bereitstellung der Luft in den belüfteten Beckenabschnitten.

Bei Belebtschlamm-Kläranlagen wird der Sauerstoff meist über eine feinblasige Belüftung eingebracht. Bei größeren Anlagen werden die einzelnen Beckenabschnitte mit Stichleitungen versorgt, für die die eingebrachte Luftmenge mittels Blendenregulierschiebern oder Klappen verstellt werden kann. Die Stichleitungen werden über eine Luftsammelschiene versorgt. Die Luft auf der Sammelschiene wird durch mehrere Drehkolbengebläse oder Turboverdichter bereitgestellt. Die in die einzelnen Beckenabschnitte eingebrachte Luftmenge muss an den momentanen Sauerstoffbedarf angepasst werden. Für die hier beschriebene verfahrenstechnische Lösung werden in der Literatur unterschiedliche Regelungskonzepte vorgeschlagen.

Als Anforderung an eine entsprechende Regelung können folgende Punkte genannt werden:

- Schutz der Stelleinrichtungen (Verdichter vor Überdrücken, Blendenregulierschieber vor per-

manenter Bewegung und Belüfter vor zu hoher Beaufschlagung und bei bestimmten Belüftern vor zu niedriger Beaufschlagung),

- Ausreichend schnelle Bereitstellung von Sauerstoff mit individuellen Sollwerten in unterschiedlichen Beckenabschnitten als Voraussetzung zur Vermeidung von Ammoniumablaufspitzen,
- Möglichst minimaler Energieeinsatz zur Bereitstellung der verfahrenstechnisch benötigten Luft,
- Einfache und robuste Parametrierung und Transparenz des Regelungskonzeptes.

In der Praxis ist festzustellen, dass installierte Regelungskonzepte diesen Anforderungen oft nicht genügen. Für eine gut funktionierende Belüftungsregelung sind einige Aspekte zu beachten. In [Alex et al. 2015a] werden Standardvarianten für diese Aufgabe analysiert, einfache Einstellregeln abgeleitet und drei ausgewählte Vorschläge für alternative Konzepte untersucht.

Initiiert wurde diese Studie durch eine Diskussion unter den Autoren, ob ein bestimmtes Regelungskonzept, das in der Praxis zum Einsatz kommt, aus regelungstechnischer Sicht prinzipiell funktionieren kann. Mit Hilfe der Simulation ließ sich diese Frage schnell und mit einem überraschenden Ergebnis beantworten.

VARIANTEN

Untersucht wurden die Varianten:

- Konstantdruckregelung,
- Gleitdruckregelung und
- Luftverteilregelung.

Konstantdruckregelung:

In den zu versorgenden Beckenabschnitten wird jeweils eine Sauerstoffmessung an repräsentativer Stelle eingesetzt und ein Sauerstoffregelkreis installiert. Die Stellgröße jedes dieser Regelkreise ist ent-

weder die Stellung des Luftschiebers oder der Sollwert eines unterlagerten Luftmengenregelkreises. Zur Sicherstellung eines ausreichenden Druckes auf der Sammelleitung wird der Druck in der Sammelleitung gemessen und über einen Druckregelkreis konstant gehalten. Als Stellgröße für diesen Regelkreis wird die Gesamtluftmenge der Gebläsestaffel verwendet. Diese Stellgröße ist über eine Steuerung auf einzelne beteiligte Gebläse aufzuteilen. Dies kann als die Standardvariante betrachtet werden.

Gleitdruckregelung:

Um die Bereitstellung der Luft energieeffizienter zu realisieren, wird als Erweiterung dieses Konzeptes häufig eine Gleitdruckregelung (oder MOV – most open valve Konzept) vorgeschlagen. Hier wird zusätzlich die Stellung aller Blendenregulierschieber ausgewertet, das Maximum dieser Werte bestimmt und über einen weiteren Regler die Stellung dieses Schiebers auf einen Sollwert (nahezu ganz offen) geregelt. Die Stellgröße dieses zusätzlichen Reglers ist der Sollwert des Druckreglers.

Luftverteilregelung:

Bei einer Umstellung von einer druckgesteuerten Gebläseregelung auf eine Luftverteilregelung werden die Regelarmaturen von der Abdrosselung des Anteils für die Druckhaltung in der Sammelleitung entbunden. Die Regelung der Verdichter erfolgt nun ausschließlich über die Sauerstoffmessungen in den Becken. Als Folge kann das System mit einem ge-

ringeren Druck gefahren werden (Siehe z. B. [Kohler 2009]).

Die Struktur des Regelkonzepts der Luftverteilregelung besteht aus zwei getrennten Regelaufgaben, der Luftverteilung aus den verketteten Sauerstoff-Einzelreglern mit je einer Luftregelarmatur als Stellglied sowie der Luftmengenregelung (Förderstrom) über einer Sauerstoff-Mittelwert-Regelung zur Einstellung der Gesamtluftmenge über die Gebläse.

Die drei Varianten (Konstantdruckregelung, Gleitdruckregelung und Luftverteilregelung) werden auch im neuen Arbeitsblatt DWA-A 268 beschrieben. Um die Vorschläge detailliert analysieren zu können, wurde ein generisches Modell einer Belebtschlamm-Kläranlage erstellt und um ein vereinfachtes Modell des Belüftungssystems ergänzt (Siehe Abbildung 8).

DIGITALES MODELL

Das Modell des Belüftungssystems besteht aus einem einfachen Modell der Sammelleitung mit der Zuleitung der Gesamtluftmenge und der Entnahme über zwei Stichleitungen. Für die zu untersuchenden Regelungsvarianten wird nur der Block-Regler durch die jeweilige Regelungsvariante ersetzt. Für eine realistische Analyse des Regelverhaltens des Systems

wurden in das Modell Blöcke zur Abbildung der Dynamik von Messeinrichtungen und der Stellglieder aufgenommen.

Der Reglerblock wird für die zu untersuchenden Varianten jeweils mit entsprechenden Modellen ersetzt. Zur Berechnung des Energiebedarfs ist ein Modell eines Drehkolbengebläses integriert.

ERGEBNISSE

Es konnte bestätigt werden, dass sowohl mit einer Gleitdruckregelung als auch mit einer Luftverteilregelung signifikante Energieeinsparungen möglich sind. Mittels der beschriebenen Gleitdruckregelung können Energieeinsparungen größer 10 Prozent erzielt werden. Dies zeigen - neben der theoretischen Ausführung - die praktischen Erfahrungen mit Kläranlagen, die mit Gleitdruckregelung ausgestattet sind. Der Aufwand besteht lediglich in der Änderung des Programms der Gebläseregelung. Das bedeutet, dass ohne jede Investition so leicht Beträge von mehr als Tausend Euro gespart werden können.

 **Auf die Drucklufterzeugung der Belegung einer Kläranlage entfallen, je nach Anlagenausstattung, zwischen 40 und 60 Prozent der elek-**

trischen Energie. Eine Möglichkeit an den Gebläsen elektrische Energie einzusparen besteht darin, den Druck den tatsächlichen Erfordernissen anzupassen. Sehr oft wird die Sammelleitung der Gebläse mit einem konstanten Druck betrieben. In belastungsschwachen Zeiten würde ein geringerer Druck vollkommen ausreichen, um die benötigte Luftmenge zu fördern. Die Energiekostensparnis ist näherungsweise gleich dem prozentualen Anteil der Druckerhöhung im Gesamtsystem.

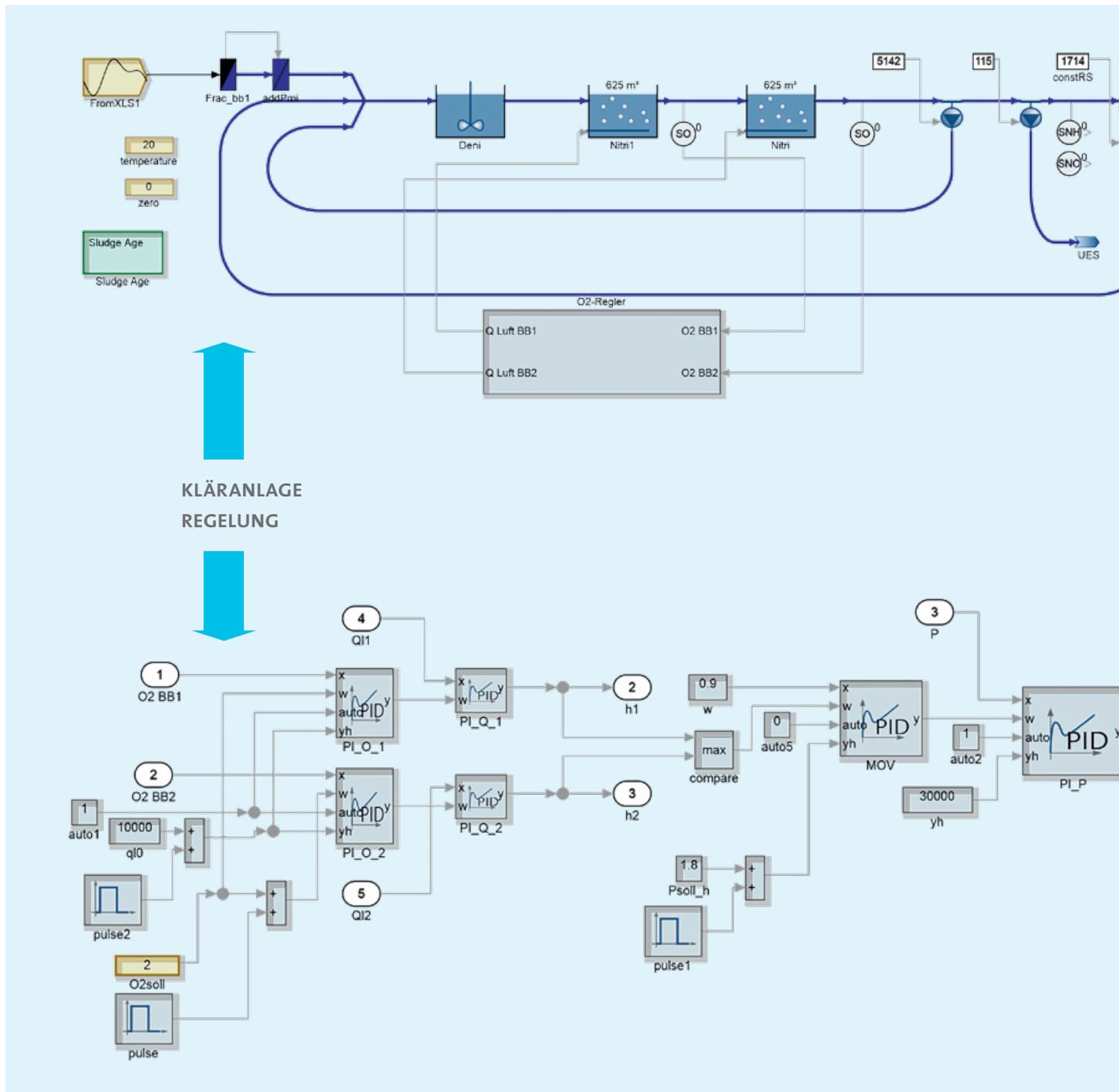
Eine Reduzierung des Drucks um 5 Prozent hat eine Reduzierung des Energiebedarfs um 5 Prozent zur Folge.

Weiterhin konnte konstatiert werden, dass mit der Luftverteilregelung ein aus regelungstechnischer

Sicht unmögliches System (überbestimmt, asymptotisch instabil), unter Kenntnis der Randbedingungen praktisch sehr wohl funktionieren kann. Regelungstechnisch analysiert läuft der instabile Modus in eine Stellgrößenbegrenzung, damit ist diese Stellgröße determiniert. Ab dann ist das System nicht mehr überbestimmt und stabil regelbar. Die Parametrierung ist in verschiedener Hinsicht einfacher und robuster als bei einer Gleitdruckregelung, aber

auch bei dieser Variante müssen Kompromisse eingegangen werden.

Mit der in [Alex et al. 2015a] vorgestellten Analyse liegen unterschiedliche Implementierungsvarianten für eine Belüftungsregelung mit variablem Druck auf der Sammelleitung vor. Darüber hinaus werden einfache und übertragbare Einstellungsempfehlungen gegeben. Mit diesen Varianten ist aus Sicht



der Autoren die Anforderungsliste, die im Abschnitt Motivation vorgestellt wurde, gut zu erfüllen. Eine sorgfältige Planung, Analyse und Inbetriebnahme ist und bleibt erforderlich, um Belüftungssysteme und ihre Regelung optimal zu betreiben.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des F/E-Projektes NoNitriNox („NoNitriNox – Planung und Betrieb von ressourcen- und energieeffizienten

Kläranlagen mit gezielter Vermeidung umweltgefährdender Emissionen“) durch das BMBF gefördert (Fördermaßnahme: „Intelligente und multifunktionelle Infrastruktursysteme für eine zukunftsfähige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung (INIS)“).

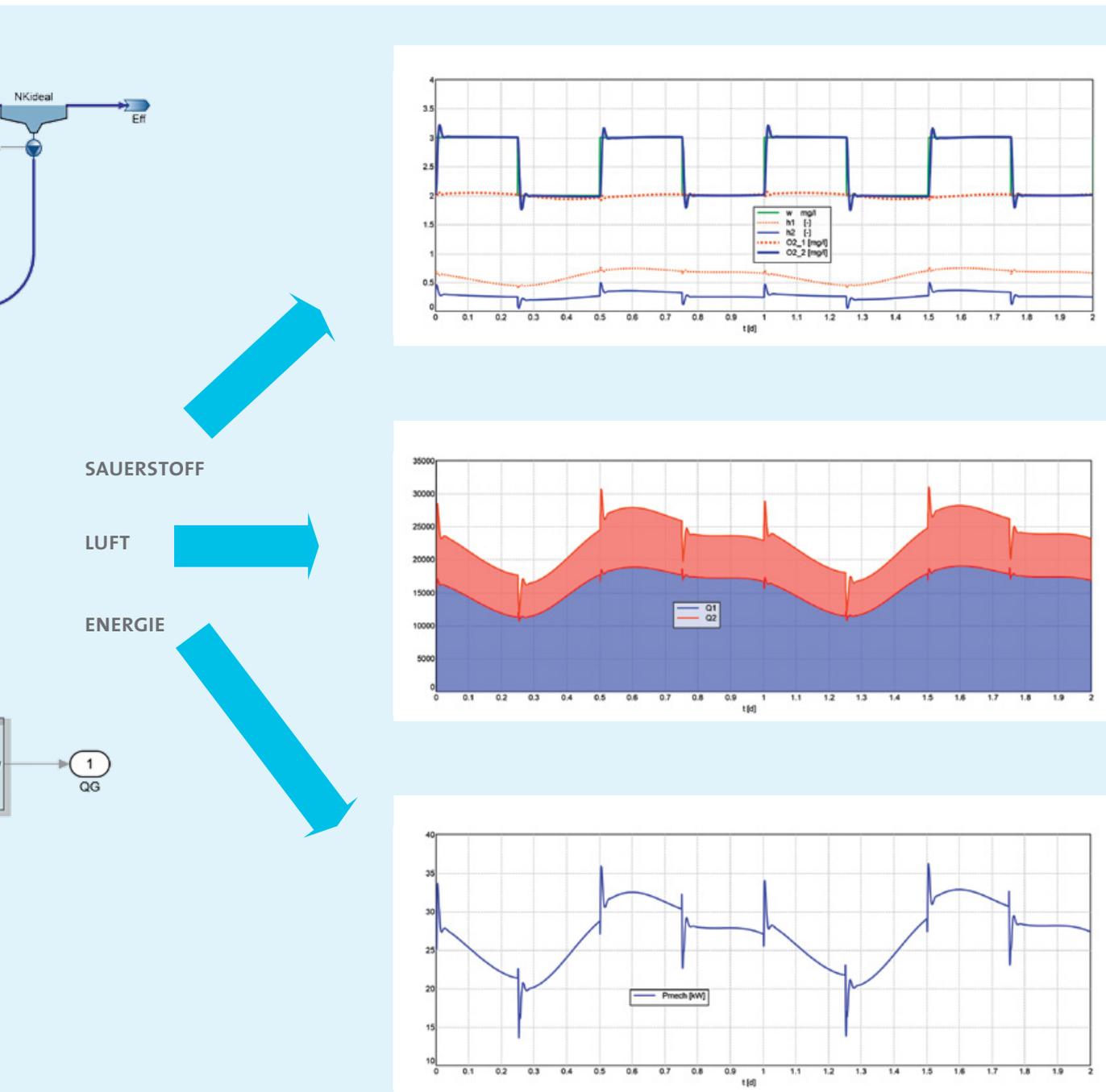


Abbildung 8: Integriertes Modell Kläranlage, Belüftungssystem und Belüftungsregelung



ZUSAMMENFASSUNG

Die dargestellten Beispiele zeigen für jeweils ausgewählte Aspekte, dass mit dem Werkzeug dynamische Simulation alle relevanten Details einer Kläranlage beschrieben werden können, die zur Abschätzung der verfahrenstechnischen Funktion und des hierfür erforderlichen Energiebedarfs notwendig sind.

Potenzial zur Minimierung des Energiebedarfs versteckt sich in vielen Details von Verfahrensgestaltung, Betriebsführung, Ausrüstung und Automatisierung:

- Optimale O₂-Profile, Variable Anpassung des O₂-Niveaus der Anlage,
- Maximale Denitrifikation,
- Angepasste Belegungsdichte der Belüfter, Anpassung an typische Betriebspunkte,
- Dimensionierung der Gebläse, Auslegung Staffel,
- Regelungskonzept Luftbereitstellung (e. g. Gleitdruck),
- Einsatz optimierter Stelleinrichtungen (Schieber) usw.

Für alle diese Fragestellungen erweist sich die Nutzung von Simulationsmodellen als leistungsfähiges Ingenieurswerkzeug. Die Nutzung der Simulation ist für einen einzelnen, isolierten Aspekt vermut-

lich nicht kosteneffektiv, aber die gemeinsame Beantwortung einer Vielzahl von Fragestellungen in Kombination mit der verfahrenstechnischen Optimierung ist sehr häufig angezeigt. Mit den aktuellen Hinweisen zur aufwandsarmen Realisierung von Simulationsstudien [Ahnert et al. 2015], [Oppermann, Hurzlmeier 2015] kann aus den Betriebsdaten einer Kläranlage mit überschaubarem Aufwand die Datenbasis für ein Simulationsmodell generiert werden. Aus diesem lassen sich neben verfahrenstechnischen Fragestellungen auch eine geeignete Automatisierung, die Ausrüstung und der Energiebedarf analysieren. Ein Anwendungsprojekt wurde z. B. für die Kläranlage Aschersleben realisiert [Leupolt, Alex 2015]. Informationsmaterial zum Projekt erhalten Sie bei der Landesenergieagentur Sachsen-Anhalt GmbH (LENA).

Die hier vorgestellte Methodik stellt den leistungsfähigsten Ansatz zur Kläranlagenplanung zur Planung der maschinentechnischen Ausrüstung und zur energetischen Optimierung von Kläranlagen dar. Bei Interesse oder Fragen wenden Sie sich an:

- das ifak - Institut für Automation und Kommunikation e. V. oder
- die Landesenergieagentur Sachsen-Anhalt GmbH

QUELLEN

- Ahnert, M.; Alex, J.; Dürrenmatt, D.J.; Langergraber, G.; Hobus, I.; Schmuck, S.; Spering, V. (2015): Dynamische Simulation als Bestandteil einer Kläranlagenbemessung nach DWA-A 131. KA – Korrespondenz Abwasser Abfall 62(7):615-624
- Alex, J.; Dürrenmatt, D.J.; Langergraber, G.; Hobus, I.; Spering, V. (2015): Voraussetzungen für eine dynamische Simulation als Bestandteil einer Kläranlagenbemessung nach DWA-A 131. KA – Korrespondenz Abwasser, Abfall 62(5):436-446
- Alex, J. (2015): Simulationsplattform zum integrierten Prozess- und Automatisierungsentwurf von Abwassersystemen. at – Automatisierungstechnik 63(7):553-563
- Alex, J.; Morck, T.; Zettl, U. (2015): Modelltechnische Überprüfung energieeffizienter Luftverteilregelungen bei Druckbelüftung. DWA-GMA-Gemeinschaftstagung „Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen“, Kassel, DWA
- Alex, J.; Morck, T.; Cybulski, B. (2017): Simulationsgestützter Entwurf, Analyse und virtuelle Inbetriebnahme von Ammoniumregelungen für Belebungsanlagen. KA – Korrespondenz Abwasser, Abfall 64(6):515-525
- DWA (2015): Arbeitsblatt DWA-A 268 – Automatisierung von einstufigen Belebungsanlagen, Entwurf
- DWA (2016): Arbeitsblatt DWA-A 216 – Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen (Dezember 2015). ISBN: 978-3-88721-276-6
- EPA (1989): Fine Pore Aeration Systems. Design manual. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/625/1-89/023, Cincinnati, OH
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and van Loosdrecht, M. (2000): Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2D and ASM3. IWA Scientific and Technical Report No.9. IWA Publishing, London, UK.
- IEC (2002): IEC 61131-3: Programmable controllers – Part 3: Programming languages, 2nd Edition, International Electrotechnical Commission, Genf
- Kohler, J. (2009): Automatisierungslösungen für Belüftungssysteme. In Baumann, P.: MSR-Technik in abwassertechnischen Anlagen, Kontakt & Studium, Band 664, expert Verlag
- Leupolt, C. und Alex, J. (2015): Analyse Energieeffizienz mit Simulation am Beispiel der Kläranlage Aschersleben, DWA Landesverbandstagung Nord-Ost, Wernigerode, 28.-29.05.2015
- Müller, E.A. et al. (1999): Energie in Kläranlagen Handbuch. Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf
- Oppermann, J. und Hurzmeier, S. (2015): Kläranlagenoptimierung mit Hilfe der dynamischen Simulation. DWA-GMA-Gemeinschaftstagung „Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen“, Kassel, DWA
- Rieger, L. (2006): The EAWAG Bio-P Module for Activated Sludge Model No. 3. Water Research 35, S. 3887–3903

IMPRESSUM

Herausgeber:

Landesenergieagentur Sachsen-Anhalt GmbH (LENA)
39108 Magdeburg, Olvenstedter Straße 4
Fon: 0391 567 2040, Fax: 0391 567 2033
E-Mail: lena@lena-lsa.de
Geschäftsführer: Marko Mühlstein

Autor:

Dr. Jens Alex
ifak – Institut für Automation
und Kommunikation e. V.
Werner-Heisenberg-Straße 1
39106 Magdeburg



Gefördert durch:



Konzept & Produktion: KREIBICH + KONSORTEN® 2018 |
www.kreibich-konsorten.de

Bildnachweis: LENA, KREIBICH + KONSORTEN® (Kläranlage Aschersleben – Titel, S. 3, 6, 7, 8, 9, 18), ifak

LENA



Landesenergieagentur Sachsen-Anhalt GmbH

Wir machen Energiegewinner.

Landesenergieagentur
Sachsen-Anhalt GmbH
Olvenstedter Straße 4
39108 Magdeburg
Tel.: 0391 567-2040
Fax: 0391 567-2033

HRB Nr.: 18884
USt ID: DE286800023
Amtsgericht Stendal

E-Mail: lana@lana-lsa.de
www.lana.sachsen-anhalt.de
www.facebook.com/lenagmbh

