

Entwicklung eines Automatisierungskonzeptes zur Steigerung der Energieeffizienz und Betriebssicherheit sowie zur Intensivierung der Prozesse und des Stoffmanagements von Klär-/Biogasanlagen

hier erste Stufe: Potenzialabschätzung zur Steigerung der Energieeffizienz

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ: 27122 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Wolfgang Lindenthal, Frank Uhlenhut, Sven Steinigeweg, Axel Borchert
Kai Wellbrock, Matthias Grottker

Emden, 21.12.2011

Entwicklung eines Automatisierungskonzeptes zur Steigerung der Energieeffizienz und Betriebssicherheit sowie zur Intensivierung der Prozesse und des Stoffmanagements von Klär-/Biogasanlagen

hier erste Stufe: Potenzialabschätzung zur Steigerung der Energieeffizienz

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ: 27122 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Wolfgang Lindenthal, Frank Uhlenhut, Sven Steinigeweg, Axel Borchert
Kai Wellbrock, Matthias Grottker

Emden, 21.12.2011

• **Projektkennblatt**
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



AZ	27122	Referat	23	Fördersumme	125.000 €
----	--------------	---------	-----------	-------------	------------------

Antragstitel **Entwicklung eines Automatisierungskonzeptes zur Steigerung der Energieeffizienz und Betriebssicherheit sowie zur Intensivierung der Prozesse und des Stoffmanagements von Klär-/Biogasanlagen (hier erste Stufe: Potenzialabschätzung zur Steigerung der Energieeffizienz)**

Stichworte Energie, Kläranlage

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
19 Monate	26.04.2010	30.11.2011	1

Abschlussbericht

Bewilligungsempfänger	Fachhochschule Emden/Leer	Tel	(04921) 807-1591
	Prozessautomatisierung & Umwelttechnik	Fax	(04921) 807-1593
	Fachbereich Technik, Abt. NWT	Projektleitung	Prof. Dr. Sven Steinigeweg
	Constantiaplatz 4	Bearbeiter	Dr. Wolfgang Lindenthal
	26723 Emden		

Kooperationspartner Fachhochschule Lübeck
Mönkhofer Weg 239
23562 Lübeck

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Aufbauend auf den vorhandenen Simulationstools und -untersuchungen an aerob arbeitenden Kläranlagen und anaerob arbeitenden Biogasanlagen soll im Rahmen des Forschungsvorhabens eine Verknüpfung beider Komponenten erfolgen, um eine Optimierung des Gesamtsystems Kläranlage-Schlammfäulung-Biogasanlage unter ökonomischen und ökologischen Aspekten zu erreichen, wobei insbesondere auch die optimale Reststoffnutzung (fest/flüssig) und die Betriebssicherheit im Fokus der Betrachtungen stehen werden. Das Gesamtprojekt soll in drei Stufen realisiert werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

In einer Vorstudie (aktuelles Projekt) wird eine Potenzialabschätzung durchgeführt, in der erarbeitet wird, wie hoch der Energieeinspareffekt bei einer Optimierung der Kläranlage wäre, welche Randbedingungen erfüllt sein müssen und welche Daten vorhanden sein müssen, um das anschließende Hauptprojekt (2. und ggf. 3. Stufe) erfolgreich zu gestalten. Ebenso sollen solche Daten für den Faulturm erarbeitet werden, die als Grundlage für eine energetische und stoffliche Bilanzierung dienen.

In dieser 1. Stufe

- erfolgt die Ermittlung des Ist-Zustandes. Es werden zwei kommunale Kläranlagen und eine Versuchskläranlage hinsichtlich ihres Energieverbrauches studiert, die verfahrenstechnischen und technischen Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauches gewichtet und ein Untersuchungskonzept für die Steigerung der Energieeffizienz, Prozessintensivierung und Betriebssicherheit erarbeitet.
- erfolgt eine Bewertung der Datenerfassung und der Analysenmethoden. Die VAK Reinfeld wird in Hinblick auf die Projektzielsetzung analysiert und erarbeitet, welche Veränderungen und Erweiterungen notwendig werden. Dafür wird eine technische Machbarkeitsstudie mit genauer Kostenanalyse erstellt.
- werden die zur Verfügung stehenden Softwaretools in Hinblick auf die Anwendung für die definierte Zielsetzung analysiert und erarbeitet, welche Ergänzungen und Änderungen notwendig werden und welche zusätzlichen Informationen/Messdaten etc. benötigt werden.
- werden Zielsetzung, Untersuchungsinhalt und Forschungskonzept des Hauptprojektes (Stufe 2 der Realisierung) formuliert. Ferner werden der personelle Aufwand und die Investitionen erarbeitet, ein detaillierter Zeit- und Kostenplan erstellt und Aussagen zu den wirtschaftlichen und wissenschaftlichen und/oder technischen Erfolgsaussichten sowie zur wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit des Projektes getroffen.

Ergebnisse und Diskussion

Das Projekt wurde wie geplant durchgeführt. Es wurden von beiden untersuchten kommunalen Kläranlagen und der Versuchskläranlage die baulichen Gegebenheiten und die Ausstattung mit Geräten und Messsonden aufgenommen. Alle Verbraucher wurden erfasst und ihre Verbrauchsdaten bestimmt. Hier ergaben sich erste Einsparungspotenziale. Dann wurde für die beiden Klärwerke je ein detaillierter Plan der Anlagen mit allen Verbrauchern gezeichnet.

Aus den ermittelten Werten wurde eine Simulation entwickelt. Hiermit konnte der Ist-Zustand der Anlagen sehr gut abgebildet werden. Durch die Anwendung von Energie-Blöcken konnte auch der Verbrauch unterschiedlicher Anlagenteile bestimmt werden. Durch Vergleich mit den Verbrauchsdaten von Kläranlagen unterschiedlicher Größenklassen, die das UBA 2008 herausgegeben hatte, konnte hier das Einsparpotenzial abgeschätzt werden.

Hier konnten auch erste Versuche mit der Simulation der gekoppelten Systeme Abwasserreinigung und Klärschlamm-Faulung durchgeführt werden, um das Potenzial gerade dieser Kopplung zu ermitteln.

Mit den bis dahin vorliegenden Daten und Einschätzungen wurde bis Ende Dezember 2011 ein Antrag zum Hauptprojekt gestellt und bei der Deutschen Bundestiftung Umwelt eingereicht.

Erste Tests der Simulation mit variierenden Belüftungen werden zurzeit durchgeführt und verlaufen recht positiv.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Teilnahme an:

23. Norddeutsche Fachtagung für Abwasserwirtschaft und Gewässerentwicklung an der FH Lübeck am 11.05.2011 mit Vorträgen von W. Lindenthal und K. Wellbrock,

18. SIMBA Anwendertreffen mit Biogasworkshop am 17. - 18. Mai im Magdeburg mit Vortrag von W. Lindenthal

Innovationsforum Wasserwirtschaft, 10.-11. Oktober 2011 in Osnabrück im Zentrum für Umweltkommunikation (ZUK) der DBU mit Vortrag von Frank Uhlenhut

DWA/VDI-Fachtagung Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen am 25./26.10.2011 in Fulda; Poster-Vorstellung, Manuskript im Tagungsband von W. Lindenthal et al.

Fazit

Das Projekt hat ein großes Einsparpotenzial der untersuchten Kläranlagen ergeben. Es ist nun genauer zu untersuchen, wie hoch der Energiebedarf einzelner Aggregate ist. Diese Daten müssen statt der bisher verwendeten Standardwerte in die Simulation eingefügt werden.

Weiterhin muss genauer ermittelt werden, wie sich im Tagesverlauf die Parameter (Zufluss, CSB, BSB₅, TKN, TS, oTS, Sauerstoff-Sättigung, Ammonium- und Nitrat-Gehalt) des Abwassers ändern. Das gleiche gilt für die Daten des Klärschlammes und eventuell einzusetzender Co-Substrate. Mit diesen Werten ist dann die Simulation durchzuführen.

Diese Fragestellungen sollen in dem beantragten Folgeprojekt untersucht werden.

Inhalt

•	Projektkennblatt	3
0	Zusammenfassung	7
1	Einleitung	8
2	Bisherige Arbeiten (Ergebnisse der Stufe 1)	12
2.1	Bestandserfassung	12
2.1.1	Kläranlage Emden	12
2.1.2	Kläranlage Reinfeld	17
2.1.3	Versuchs- und Ausbildungskläranlage (VAK)	26
2.2	Möglichkeiten zur Bestimmung des Energiebedarfs	28
2.2.1	Simulation in SIMBA®	28
2.2.2	Ermittlung des Energiebedarfs einzelner Aggregate anhand der Leistungskennlinie	33
2.2.3	Messung der Leistungsaufnahme mit Hilfe von Stromzangenamperemetern	40
2.2.4	Fazit	41
3	Literatur	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verbrauch der Kläranlage Emden an elektrischer Energie im Jahr 2010. Die elektrische Energie aus den BHKWs wurde zu ungefähr gleichen Teilen aus Erdgas und Faulgas erzeugt.	14
Abbildung 2:	Energiebilanz der 1. Arbeitswoche 2010 (04.01. – 11.01.2010).	15
Abbildung 3:	Anteile am simulierten Gesamtenergieverbrauch (ohne Schlammbehandlung) der Kläranlage Emden.	16
Abbildung 4:	Jahreslastgang für den Stromverbrauch der Kläranlage Reinfeld (2009 und 2010; Tageswerte).	22
Abbildung 5:	Wochentägliche Abhängigkeit des Energiebedarfs bei Trockenwetterabfluss.	23
Abbildung 6:	Exemplarischer Zusammenhang zwischen Niederschlagshöhe und Energieverbrauch.	24
Abbildung 7:	Anteile am Gesamtstromverbrauch der Kläranlage Reinfeld (2010).	25
Abbildung 8:	Typischer Verlauf der Ammonium-, Nitrat- und Sauerstoffkonzentration in der 10-stufigen Kaskade.	26
Abbildung 9:	Verfahrensschema der VAK (Ist-Zustand).	27
Abbildung 10:	Tagesgang des HKW Emden.	29
Abbildung 11:	Modellierung des HKW Emden unter SIMBA 6.	31

Abbildung 12:	Vergleich der realen Daten (ausgezogene Linie) mit den simulierten Daten (gestrichelt)	32
Abbildung 13:	Simulierter Verbrauch der Kläranlage Emden an elektrischer Energie.	33
Abbildung 14:	Methoden zur Bestimmung von Leistungskennlinien für die Implementierung in das ASM-ADM-Energiemodul [Wellbrock et al. 2011].	34
Abbildung 15:	Teilgraphische Bestimmung der Leistungskennlinie anhand hydraulischer Berechnung der Förderstrom abhängigen Verlusthöhe. Hier exemplarisch für die Pumpen des Zulaufpumpwerkes; angenommene Rohrrauheit $k = 0,4$ mm [Auszug aus KSB-Katalog, Sewatech D 150-251, verändert und ergänzt].	35
Abbildung 16:	Probleme bei der Bestimmung des Wirkungsgrades - Während der Betriebszeit t_b wird ein mittlerer Förderstrom Q_m ermittelt. Der hieraus berechnete Stromverbrauch E_{calc} wird über- oder unterschätzt, da der tatsächliche Wirkungsgrad η nicht korrekt ermittelt wird.	36
Abbildung 17:	Bestimmung der Anlagenkennlinien und der Leistungskennlinie exemplarisch für verschiedene Rohrrauheiten (grau hinterlegt ist der übliche Lastbereich).	38
Abbildung 18:	Stromverbrauch-Summenkurven. Angegeben sind jeweils der tatsächliche Stromverbrauch sowie der berechnete Verbrauch auf Basis eines mittleren Förderstromes einschließlich ständiger, lastunabhängiger Verbraucher.	39
Abbildung 19:	Vergleich zwischen tatsächlichem, diskontinuierlich erfasstem Stromverbrauch und mittels Stromzangenamperemeter kontinuierlich gemessenen Werten. Zu beachten ist die Differenz, die auf der Vernachlässigung von lastunabhängigen, ständigen Verbrauchern (z. B. Frequenzumrichter) bei der Messung beruht.	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	CSB-Bilanzierung des HKW Emden.....	12
Tabelle 2:	Bilanzierung der elektrischen Energie der Kläranlage Emden für das Jahr 2010	15
Tabelle 3:	Mittlere Konzentration der Teilströme im Zu- und Ablauf zur Vorklärung sowie Ablaufwerte im Vergleich zu den maßgebenden Überwachungswerten für die Kläranlage Reinfeld	18
Tabelle 4:	Bilanzierung der Tagesfrachten für die Kläranlage Reinfeld (gasförmige Austräge aus Differenzbildung).....	19

0 Zusammenfassung

Moderne kommunale Kläranlagen bestehen u. a. aus einem Belebtschlammverfahren zur Entfernung von Kohlenstoffverbindungen (BSB, CSB), Ammonium und Nitrat. Hierzu wird Sauerstoff/Luft eingetragen. Häufig schließt sich eine anaerobe Schlammfäulung an, bei der ein Teil der organischen Fracht des Belebtschlammes in Biogas (ca. 50 – 60 % Methan) umgewandelt wird. Im Bereich der Kläranlage wird (elektrische) Energie verbraucht, im Bereich der Fäulung wird (chemische) Energie zugänglich gemacht.

Um schwankende Zulaufmengen und Lastfälle abzufangen, sind viele Klär-/Biogasanlagen überdimensioniert, bzw. werden möglichst so gefahren, dass die normalen Schwankungen im Zulauf und zu erwartende Lastfälle abgefangen werden. Die sichere Einhaltung der gesetzlich vorgegebenen Ablaufwerte hat hierbei in der Regel oberste Priorität. Eine Steuerung und Regelung in Echtzeit, welche auf variierende stoffliche oder hydraulische Belastungen reagieren könnte, wird nicht durchgeführt, u. a. weil das biologische System sehr träge reagiert. Alle Einstellungen für den Klärwerksbetrieb werden bisher möglichst konstant gehalten; ein Optimum in der Energiebilanz wird nicht gefahren.

Durch die Einführung einer lastabhängigen Kopplung mit der Biogaserzeugung kann eine Prozessoptimierung des Gesamtsystems bei schwankendem Zulauf erreicht werden. Ziel des Vorhabens war es, Vorarbeiten zu einem Projektantrag durchzuführen, um anhand einer modellgestützten Prozessführung für kleine und mittelgroße Kläranlagen in Echtzeit die relevanten Abwasserparameter messtechnisch zu erfassen. Diese sollen dann in einer parallelen Simulation der Kläranlage eingespeist werden. Vor dem Hintergrund zu erwartender Belastungen (z. B. typische Tagesganglinien) werden im Weiteren die entsprechenden Regelparameter (Rezirkulationsrate, Belüftungsleistung, etc.) ermittelt und ebenfalls in Echtzeit umgesetzt. Hierbei sollen die Ablaufwerte auf ein mögliches Minimum reduziert werden. Durch die Implementierung von Energieblöcken in die Simulation soll zudem der Betrieb der Kläranlage auf einem energetischen Bedarfsminimum erfolgen. Im Weiteren wird angestrebt, den Abwasserreinigungsprozess in der Art zu steuern, dass bei der folgenden anaeroben Schlammstabilisierung ein möglichst maximaler Faulgasertrag erzielt wird. Die technischen und rechtlichen Möglichkeiten zur Co-Vergärung werden hierbei berücksichtigt.

In der abgeschlossenen Projektphase wurde ein Kataster der baulichen Gegebenheiten und der Energieverbraucher zweier kommunaler Kläranlagen und einer Versuchskläranlage erstellt. Weiterhin wurde mit Standardwerten eine Simulation einer dieser Kläranlagen durchgeführt um die realen Werte zu überprüfen. Aus diesen Voruntersuchungen ergab sich ein großes Potenzial zur Optimierung der Energieeffizienz der untersuchten Kläranlagen. Besonders die in Echtzeit zu erhebenden Abwasserparameter sollen identifiziert und auf ein erforderliches Minimum reduziert werden. Zudem kommt der Kopplung der verwendeten ASM und ADM-Modelle eine besondere Rolle zu, um den gesamten Abwasserreinigungsprozess einschließlich der Fäulung auf ein energetisches Minimum steuern zu können. Der korrekten Validierung der Leistungskennlinien von relevanten Verbrauchern (Zulauf- und Rezirkulationspumpen, Belüftung, etc.) kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu. Das System soll somit den Anforderungen an eine Abwasserreinigung im üblichen Lastbereich genügen. Daneben soll es mögliche Störfallszenarien berücksichtigen.

1 Einleitung

Die biologische Reinigung von organischen Abwässern ist seit langem Stand der Technik. Zwei nennenswerte Alternativen sind der aerobe und der anaerobe Prozess. Bei letzterem wird aus organisch hoch belasteten Abwässern, wie sie beispielsweise in der Industrie (Lebensmittelindustrie, Papierherstellung, etc.) anfallen, durch einen Faulungsprozess unter Luftabschluss Biogas erzeugt.

In den meisten kommunalen Kläranlagen wird das Abwasser jedoch einer biologischen Behandlung in Belebungsbecken nach dem Belebtschlammverfahren unterzogen (aerober Prozess). Die Reduzierung organischer Verunreinigungen und von Stickstoffverbindungen steht hierbei im Mittelpunkt. Im belüfteten (aeroben) Bereich des Belebungsbeckens wird Ammonium zu Nitrat oxidiert (nitrifiziert), im nachfolgenden unbelüfteten (anoxischen) Schritt wird das Nitrat zu gasförmigem Stickstoff abgebaut (denitrifiziert). Der Großteil der organischen Kohlenstoffverbindungen wird hierbei zu CO_2 und H_2O abgebaut. Der entstehende Klärschlamm wird vielfach nur noch entwässert und dann einer Verbrennung zugeführt oder deponiert. Verwertung als Dünger findet aufgrund rechtlicher Restriktionen nur selten statt.

Vor allem Kläranlagen ab der Größenklasse 4 (> 10.000 EW) verwerten den anfallenden Klärschlamm weiter und setzen ihn in Faultürmen anaerob um (anaerobe Schlammstabilisierung). Hierbei werden die verbleibenden organischen Bestandteile im Wesentlichen zu Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4) umgesetzt. Dieses Faulgas kann in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) zur Gewinnung von elektrischer und thermischer Energie verwendet werden.

Auf vielen Kläranlagen wird ein Großteil der Energie für die Belüftung in der biologischen Stufe verwendet. Um die Grenzwerte im Ablauf der Kläranlage sicher einzuhalten, wird häufig ein zu hoher Sauerstoff-Gehalt angestrebt (z. B. $3 \text{ mg O}_2/\text{L}$). Theoretisch wäre ein O_2 -Gehalt von ca. $0,5 \text{ mg O}_2/\text{L}$ [Alex 2010] nicht nur ausreichend, sondern insbesondere bei Anlagen mit vorgeschalteter Denitrifikation auch im Hinblick auf eine effiziente Stickstoff-Elimination dringend erforderlich. Bei zu hohen O_2 -gehalten erfordert dies z. T. sehr hohe interne Rezirkulationsraten, wodurch ein zusätzlicher erheblicher Energieverbrauch verursacht wird. Die „übertriebene Sicherheit“ führt mithin zu einem unnötig hohen Energieverbrauch. Durch eine höhere Informationsdichte und redundante Automatisierungstechnik ließe sich diesem Sicherheitsdenken der Kläranlagenbetreiber begegnen. In diesem Vorhaben sollen hierfür die Grundlagen geschaffen werden.

Der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten für die Abwasserreinigung beträgt je nach Anlagenkonstellation zwischen 30 und 40 %. Der Anteil der Abwasserreinigung am gesamten kommunalen Strombedarf beträgt rund 35 % [Seibert-Erling 2011]. Insgesamt werden in Deutschland jährlich bis zu 4.400 GWh elektrischer Energie für die Abwasserreinigung aufgewendet und dadurch ca. 3 Mio. t CO_2 ausgestoßen [UBA 2008, DWA 2010b, Schmitt 2010]. Insgesamt tragen Kläranlagen somit zu ca. 0,7 % des bundesweiten Stromverbrauchs bei. Mehr als 80 % davon werden in großen Kläranlagen mit mehr als 10.000 EW (GK4 und GK5) benötigt [Haber Kern et al. 2006, 196].

Trotz eines Anteils von unter 1 % am gesamtdeutschen Stromverbrauch wird vor dem Hintergrund erwarteter steigender Energiekosten und der Zielvorgabe einer CO_2 -Reduzierung die Notwendigkeit offenbar, auch die Abwasserreinigung effizienter zu gestalten. In Deutschland stieg der Energiebedarf der Kläranlagen bis in die Mitte der 1990er Jahre aufgrund zusätzlicher Verfahrensschritte und gestiegener Anforderungen an die Ablaufwerte kontinuierlich an und

stagniert seitdem auf einem hohen Niveau. Daneben weist die Energieerzeugung auf Kläranlagen hohe, bisher ungenutzte Potentiale auf [Dohmann und Schröder 2011]. Inflationsbereinigt werden die spezifischen Stromkosten für Kläranlagen in den nächsten zehn Jahren um den Faktor 1,5 bis 2 steigen [Schröder 2010]. In Regionen mit starkem Bevölkerungsrückgang erhält die Energiekosteneinsparung noch größere Bedeutung, da hier die spezifischen Kosten aufgrund nicht genutzter Kapazitätsreserven der oftmals überdimensionierten Kläranlagen noch stärker ansteigen werden.

Der Toleranzwert des spezifischen Energiebedarfs, der ein übliches Maß der Energieeffizienz angibt, welches mit vertretbarem Aufwand erreichbar ist, beträgt für Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 im Belebungsverfahren mit Belüftung der Nitrifikationszone etwa 45 bis 55 kWh/(EW · a) [vgl. hierzu: Müller et al. 1999; Flohr 2008; Haberkern et al. 2008; UBA 2009; Theilen 2011]. Die Zielwerte, welche ein Optimum darstellen, das unter gewöhnlichen Randbedingungen kaum erreichbar ist, liegen im Bereich von 18 bis 30 kWh/(EW · a) je nach zusätzlicher Abwasserreinigung (Membranfiltration, Flockungsfiltration, UV-Desinfizierung). *„Betrachtet man die 10 % der Anlagen der einzelnen Größenklassen mit den jeweils geringsten Energieverbräuchen, ist festzustellen, dass diese mit einem spezifischen Elektrizitätsverbrauch von ca. 20 – 28 kWh / (EW*a) so dicht zusammen liegen, dass von vergleichbaren Potenzialen ausgegangen werden kann“* [Theilen 2011]. Diese Referenzwerte dienen einer ersten Bewertung der Energieeffizienz einer Kläranlage.

Dem Energieverbrauch steht auf Kläranlagen mit einer anaeroben Schlammstabilisierung die Energieerzeugung aus dem Faulgas gegenüber. Ausgehend von einem spezifischen Klärgasvolumen von 20,7 l/(EW · d) [DWA 2010b, 23] beträgt das Primärenergiepotenzial bei einem mittleren Heizwert von 6,5 kWh/m³ (Methangehalt: 65 %) rund 49 kWh/(EW · a). Bei Nutzung in einem BHKW wären mithin etwa 15,7 kWh/(EW · a) Strom (elektr. Wirkungsgrad: 32 %) und 24,5 kWh/(EW · a) spezifische Wärmeenergie (thermischer Wirkungsgrad: 50 %) nutzbar. Ein Deckungsgrad des Strombedarfs von rund 28 bis 35 % aus regenerativen Energiequellen ist somit möglich.

Der Anteil der Stromerzeugung aus Faulgas an der insgesamt regenerativ erzeugten Energie beträgt etwa 1,1 bis 1,4 %. Gemessen am gesamten Stromendverbrauch in Deutschland betrug die Stromerzeugung aus Faulgas in 2006 somit etwa 0,15 %. Der Anteil der aus dem Faulgas gewonnenen Wärmeenergie an den regenerativ gewonnenen Wärmeenergien beträgt insgesamt etwa 1,2 % [Haberkern et al. 2008, 47; DWA 2010, 19]. Zu beachten ist, dass derzeit ein großer Anteil des Klärschlammaufkommens nicht oder nur unvollständig umgesetzt wird. Vor dem Hintergrund der bestehenden Kapazitätsreserven ist somit ein deutliches Potenzial zur Ausnutzung dieser regenerativen Energiequelle zu identifizieren

Grundsätzlich ist im Faulschlamm ein hohes energetisches Potenzial vorhanden. Selbst gut ausgefaulter kommunaler Klärschlamm hat noch einen Anteil an organischer Feststoffmasse von rund 45 % [Dohmann und Schröder 2011]. Durch geeignete Maßnahmen wie z. B. die Desintegration oder die Mitbehandlung von externen, nassvergärbaren Rohstoffen (biogene Abfälle) kann eine Verbesserung des Abbauverhaltens und eine Steigerung der Faulgasproduktion erreicht werden. Darüber hinaus weisen bestehende Faulbehälter häufig große Kapazitäten für die Mitbehandlung von Co-Substraten auf. Faulungsanlagen können daher bereits bei Kläranlagen mit Ausbaugrößen unter 10.000 EW wirtschaftlich sein. Bisher ist anaerobe Schlammstabilisierung bei Anlagen dieser Größenordnung nicht obligatorisch. Im Jahr 2006 waren lediglich

rund 1.190 Kläranlagen in Deutschland (knapp 12 %) mit einer Faulung zur Klärgasgewinnung ausgestattet [DWA 2010b, 23].

Durch eine integrierte Steuerung der Kläranlage einschließlich der Faulung kann der Fremdenergiebezug minimiert werden. Des Weiteren kann durch eine zeitliche Steuerung der BHKWs unter Ausnutzung von Kapazitäten im Gasspeicher die Spitzenlast verringert werden. Der Kläranlagenbetreiber kann hierdurch, je nach Vertragsgestaltung mit dem Energieversorger, deutlich Kosten sparen.

Darüber hinaus ermöglicht eine integrative Kopplung von Kläranlage und Biogasanlage die Einbindung der Kläranlagen in die dezentrale Energieversorgung der Zukunft. Über eine Kombination klassischer Energieträger (Faulgas, Klärschlamm) mit nicht unterbrechungsfrei verfügbaren Energien (Windenergie, Solarenergie) könnten Kläranlagen einen Beitrag zur Abdeckung der Residuallast leisten [Dohmann und Schröder 2011].

Ziel des Projektes ist es, anhand einer integrierten Simulation von Kläranlage und Faulung den Fremdenergiebezug zu minimieren. Hierfür soll der interne Energiebedarf bei einer Maximierung der Faulgasausbeute minimiert werden. Die Simulation stellt hierbei die Basis für eine Steuerung der Kläranlage in Echtzeit dar (simulationsgestützte Prozessführung). Damit der Betrieb auf einem Verbrauchsminimum erfolgen kann, müssen in das Modell Energieblöcke integriert werden, die den tatsächlichen Verbrauch der verschiedenen Aggregate bei unterschiedlichen Betriebspunkten bestmöglich widerspiegeln.

Die dynamische Simulation hat sich in den vergangenen Jahren als Werkzeug zur Auslegung, Bemessung und Optimierung von Kläranlagen sowie zur Beschreibung der dort stattfindenden Abbauprozesse immer mehr etabliert. Mit Hilfe geeigneter Modellierungen (z. B. ASM-Modelle der IWA (International Water Association, früher: IAWQ - International Association on Water Quality) lässt sich das Verhalten einer Belebungsanlage sowohl hinsichtlich des aeroben Kohlenstoffabbaus als auch hinsichtlich der Nitrifikation und Denitrifikation beschreiben. Nach zehnjähriger Erfahrung in der Anwendung des ASM 1 veröffentlichte die IWA das ASM 3 [Gujer 1998], welches einige Schwächen des ASM 1 korrigiert, nicht unbedingt notwendige Teile vereinfacht und neue Effekte berücksichtigt.

Für die Simulation des anaeroben Abbaus liegen ca. 70 sehr unterschiedliche mathematische Modelle vor. Aufgrund der Vielzahl von Modellen entwickelte eine Arbeitsgruppe der IWA das ADM 1 [Batstone 2002], dessen Einsatz für vielfältige Abwässer, Reaktoren etc. möglich ist. Das ursprünglich für die Simulation der Schlammbehandlung in Abwasserreinigungsanlagen konzipierte ADM 1 wurde bereits erfolgreich für die Modellierung von großtechnischen Biogasanlagen eingesetzt [Lübken 2005, Wolf 2006]. In weiteren Projekten wurde zusätzlich eine Energie-, Umweltwirkungs- und Kostenberechnung in die Simulation integriert [Moshage 2003, Niemann 2004, Seick 2008]. Vom Antragsteller wurden verschiedene Projekte zur Simulation von Biogasanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Verwendung von Co-Substraten bearbeitet [Rojas 2010].

Aufbauend auf den vorhandenen Simulationstools und -untersuchungen an aerob arbeitenden Kläranlagen und anaerob arbeitenden Biogasanlagen soll im Rahmen des Forschungsvorhabens eine Verknüpfung beider Komponenten erfolgen, um eine Optimierung des Gesamtsystems Kläranlage-/Biogasanlage unter ökonomischen und ökologischen Aspekten zu erreichen. Dabei werden insbesondere auch die optimale Reststoffnutzung (fest/flüssig) und die Betriebssicherheit im Fokus der Betrachtungen stehen.

Das Vorhaben, über das hier berichtet wird, wurde mit der Simulationssoftware SIMBA6[®] des Instituts für Automation und Kommunikation (ifak, Magdeburg) durchgeführt. Die in SIMBA[®] implementierten Energieblöcke wurden vom ifak auf der Basis von Konvertermodellen entwickelt. Die Konvertermodelle können vom Anwender selbst editiert und verändert werden (z. B. modifizierte Gleichungen zur Energieberechnung einzelner Verbraucher).

Laut Aussage des ifak wurden die Energieblöcke bislang noch kaum benutzt. Die ersten Erfahrungen im aktuell laufenden Vorprojekt (DBU-Projekt AZ 27122; HS Emden/Leer mit FH Lübeck) mit den Energieblöcken sind zwar vielversprechend, verdeutlichen jedoch die Notwendigkeit, die Energieblöcke bestmöglich zu definieren, um ein Energieminimum korrekt simulieren zu können.

Ein weiteres Problem war bislang, dass SIMBA[®] zwar alle Bereiche der Siedlungswasserwirtschaft vom Kanalnetz über die Abwasser- bis zur Schlammbehandlung abbilden und simulieren kann, es jedoch hauptsächlich von Spezialisten verwendet wird, die sich nur mit einem Teilaspekt beschäftigen. Nur sehr wenige Arbeitsgruppen simulieren das gekoppelte System Kläranlage/Biogasanlage, um dann mit den Ergebnissen eine modellgestützte Prozessführung aufzubauen.

Mit der Simulation kann nicht nur die Einhaltung von Ablaufwerten optimiert werden, sondern durch die Einbeziehung von Energieblöcken auch der Fremdenergiebedarf. Hier wiederum wird besonderes Augenmerk auf die Kopplung des Energieverbrauchs in den Belebungszone mit dem Primärenergiegehalt aus dem entstandenen Faulgas gelegt.

Die erste Projektphase, über die hier berichtet wird, befasste sich überdies mit der Bestandserfassung von zwei kommunalen Kläranlagen (Emden und Reinfeld) sowie der Versuchs- und Ausbildungskläranlage (VAK) Reinfeld. Ziel hierbei war es, die für die Simulation erforderlichen Daten zu erheben, bereits im Vorfeld Optimierungspotenziale aufzuzeigen und die erforderlichen Grundlagen für die Implementierung einer modellgestützten Prozessführung herauszustellen. Daneben wurden verschiedene Möglichkeiten untersucht, wie der lastabhängige Verbrauch einzelner Aggregate bestimmt und schließlich in der Simulation abgebildet werden kann.

2 Bisherige Arbeiten (Ergebnisse der Stufe 1)

Zu Beginn des Projekts erfolgte die Erfassung der baulichen Gegebenheiten der untersuchten Kläranlagen (Emden, Reinfeld und VAK). Eine Bestandsaufnahme der verschiedenen Bereiche der Kläranlagen wurde durchgeführt. Hierzu gehörte das Erfassen der Becken-Volumina, der Durchflüsse sowie der Frachten um die Volumen- und Stoffströme abbilden zu können. Alle Verbraucher wurden mit ihren Leistungsdaten erfasst. Hierzu waren verschiedene Rechen und Rührwerke sowie als größte Energie-Verbraucher Pumpen und Gebläse zu untersuchen. Weiterhin wurde die entsprechende Mess-, Steuer- und Regeltechnik erfasst.

2.1 Bestandserfassung

2.1.1 Kläranlage Emden

2.1.1.1 Kenndaten

Das HKW Emden (Hauptklärwerk der Stadt Emden) dient zur Behandlung kommunaler Abwässer der Stadt Emden plus einiger umliegender Gemeinden; es gibt keine nennenswerten Industrie-Einleitungen. Es ist für 90.000 Einwohner-Werte ausgelegt; z. Zt. sind 75.000 Einwohnerwerte angeschlossen. Demnach ist sie der Größenklasse 4 zuzuordnen.

Durch Geländegegebenheiten herrscht ein hoher Fremdwasseranteil, der zu recht niedrigen Konzentrationen der Kohlenstoff- und Stickstoff-Verbindungen im Abwasser führt. **Anlage 1** zeigt das Verfahrensschema des HKW Emden mit den entsprechenden Stoffströmen sowie Regel- und Steuerungseinrichtungen; **Tabelle 1** zeigt den Verlauf der CSB-Eliminierung.

Tabelle 1 CSB-Bilanzierung des HKW Emden.

Ort der Messung		CSB [mg O ₂ /L]	
Zulauf		1747	
nach mechanischer Reinigung		1768	
Vorklärung 1		1814	
	Vorklärung 2		1737
Belebungsbecken 1 Zone I		1802	
	Belebungsbecken 2 Zone II		1742
Belebungsbecken 1 Zone II		1697	
	Belebungsbecken 1 Zone II		1790
Nachklärbecken 1		< 15	
	Nachklärbecken 2		< 15

2.1.1.2 Verfahrensschema

Das Abwasser aus der Kanalisation wird im Hauptpumpwerk (vier Pumpen mit je 75 kW) um 13 m angehoben. Die Luft im Kanalsystem wird durch einen Biofilter abgesaugt (2 mal 3 kW, 1 mal 7,5 kW). Anschließend fließt das Rohabwasser im Gefälle durch die Anlage. Das Abwasser gelangt zunächst in die mechanische Reinigungsstufe: ein Rechengebäude mit zwei Rechen, belüftetem Langsandfang, Sandwäsche, Fettfang und weiteren kleineren Energieverbrauchern.

Weiterhin besteht hier die Möglichkeit, den Inhalt von Hauskläranlagen, der mit Tankwagen angeliefert wird, vorzubehandeln und dann dem Abwasserstrom zuzuführen.

Anschließend wird der Abwasserstrom auf zwei identische Straßen aufgeteilt. Auf ein Vorklärbecken (1094 m³; Schlammräumer 0,75 kW) folgt die biologische Reinigungsstufe, die aus jeweils einem Belebungsbecken mit den Belebungszone I (1940 m³) und II (2460 m³) besteht. Belebungszone I ist mit online-Sensoren zur Messung von Redoxpotenzial, Ammonium- und Sauerstoffgehalt ausgestattet. Über eine Fuzzy-Regelung wird der Lufteintrag in dieser Zone gesteuert. Bei Belüftung läuft hier die Nitrifikation unter oxidischen Bedingungen ab. Wird nicht belüftet, findet die Denitrifikation unter anoxischen Bedingungen statt.

In der Emdener Kläranlage ist somit eine intermittierende Belüftung realisiert. Es sind oxische und anoxische Bereiche zeitlich voneinander getrennt während normalerweise die beiden Bereiche räumlich hintereinander geschaltet sind.

Es folgt Belebungszone II, die ebenfalls über eine Fuzzy-Regelung gesteuert wird. Hier sind online-Sonden für Ammonium, Nitrat und Sauerstoff installiert.

Die Belüftung der Belebungsbecken erfolgt mit fünf Gebläsen (je 75 kW). Je ein Gebläse bedient eine Zone, ein Gebläse dient als Reserve. Dauer und Intensität der Belüftung werden über einen Fuzzy-Algorithmus geregelt. Die beiden Belebungszone werden mit insgesamt vier Rührwerken (1,3 kW) umgewälzt.

Das gereinigte Abwasser gelangt in ein Nachklärbecken (2922 m³), in dem sich das Klarwasser durch Sedimentation vom Belebtschlamm trennt. Über das Hauptpumpwerk wird das gereinigte Abwasser in die Ems als Vorfluter geleitet.

Täglich werden aus jedem Nachklärbecken etwa 6480 m³ Rücklaufschlamm in Belebungszone I zurückgeführt (Rücklaufschlammumpfen, 4 kW) und 70 m³ Überschussschlamm in das entsprechende Vorklärbecken gepumpt (Überschussschlammumpfen, 1,9 kW). Aus den Vorklärbecken werden täglich jeweils 90 m³ Frischschlamm an den Voreindicker weitergegeben. Alle drei Tage wird der Klärschlamm (300 m³) aus dem Voreindicker in die beiden Faultürme gepumpt (3,1 kW). In den Faultürmen befindet sich je ein Rührwerk (9,7 kW) das den Faulschlamm umwälzt; die Drehrichtung wird alle 2 Stunden gewechselt, damit sich keine Schichtung bildet. Hier findet eine anaerobe Schlammfäulung statt, bei der als Hauptprodukte CO₂ und CH₄ entstehen.

Dieses Faulgas wird zu einem Blockheizkraftwerk (150 kW elektrische Leistung; 250 kW thermische Leistung) geleitet und dort in elektrische und thermische Energie umgewandelt. Der ausgefäulte Schlamm (300 m³ in drei Tagen) wird in einem Nacheindicker gesammelt und dann in Vererdungsbeete gepumpt. Die im BHKW erzeugte elektrische Energie wird zum Betreiben des Klärwerks verwendet, die Wärmeenergie dient zum Vorheizen des Klärschlammes vor dem Einpumpen in den Faulturm und zum Erhitzen der Faultürme.

2.1.1.3 Energiebilanz

Es wurde der Energieverbrauch der einzelnen Anlagenteile und Prozesse ermittelt. Da in Emden keine Stromverbräuche einzelner Anlagenteile aufgezeichnet werden, sondern nur der Stromverbrauch der gesamten Anlage über das Jahr gemessen wird, konnte der Anteil dieser Anlagenteile am Gesamtverbrauch nicht bestimmt werden. Allerdings wurden online-Daten (Minutenwerte) der Kläranlage Emden zur Steuerung der Belüftung in den Belebungsbecken sowie die Lastgangprofile (Strom: 15 Minuten-Werte, Gas: 1 Stunden-Werte) der Stadtwerke Emden herangezogen.

Der Energieverbrauch des HKW Emden wird z. T. durch selbst erzeugten Strom aus einem Blockheizkraftwerk gedeckt. Bei Verbrauchspitzen wird zusätzlich Strom der Stadtwerke Emden benötigt. Die beiden Module des BHKWs werden mit Faulgas oder mit Erdgas betrieben (**Abbildung 1**). Da durch die staatliche Förderung (Kraft-Wärme-Kopplung, Erneuerbare-Energien-Gesetz) die Erzeugung von elektrischer Energie aus Erdgas in einem BHKW billiger ist als der direkte Bezug elektrischer Energie, wird zeitweise Erdgas genutzt. Die anfallende Wärmeenergie wird zum Beheizen der beiden Faultürme verwendet. Im Sommer, wenn die Wärme nicht in vollem Umfang verwendet werden kann, läuft daher i.d.R. nur ein Modul.

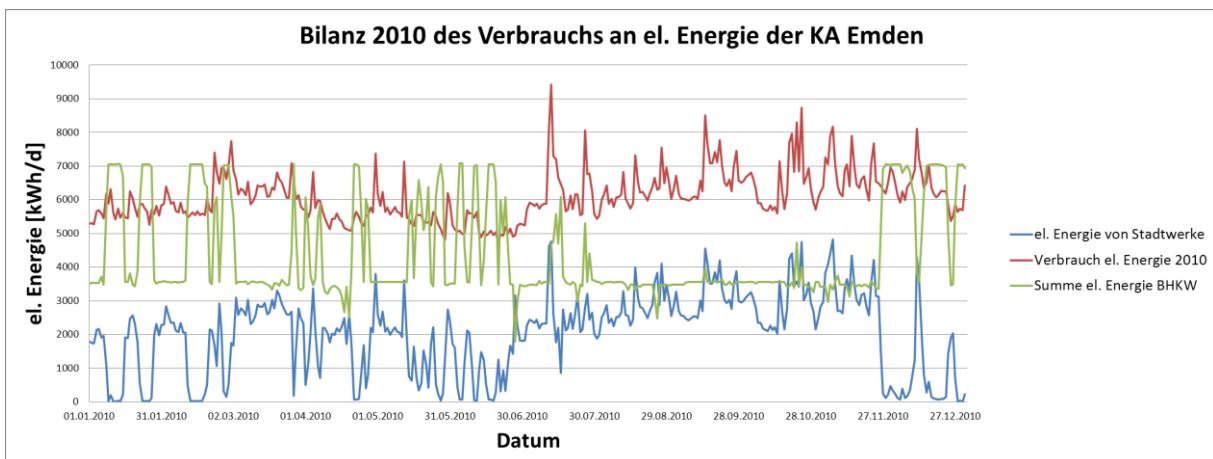


Abbildung 1: Verbrauch der Kläranlage Emden an elektrischer Energie im Jahr 2010. Die elektrische Energie aus den BHKWs wurde zu ungefähr gleichen Teilen aus Erdgas und Faulgas erzeugt.

Im Wochenverlauf (**Abbildung 2**) ist ein recht gleichmäßiger Rhythmus im Tagesgang zu erkennen: der Energieverbrauch steigt von ca. 6:00 Uhr bis gegen 12:00 Uhr an, fällt dann leicht ab und erreicht ein erneutes Maximum gegen 18:00 Uhr, um dann wieder bis um 6:00 Uhr abzufallen.

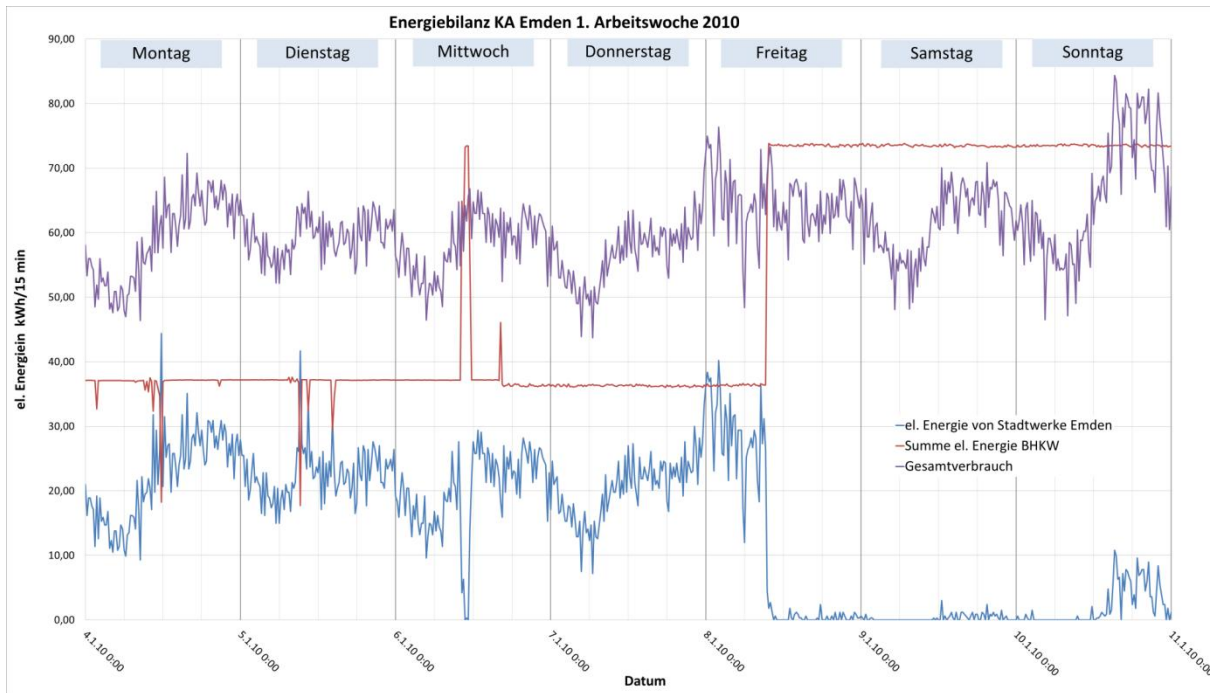


Abbildung 2: Energiebilanz der 1. Arbeitswoche 2010 (04.01. – 11.01.2010).

Am Montag und am Wochenende ist das kleine Minimum am Nachmittag im Diagramm nicht zu erkennen. Am Freitag und am Sonntag sind im betrachteten Zeitraum Regenfälle der Grund für einen höheren Energieverbrauch. Am Freitag und Samstag wurde durch den Betrieb beider BHKW-Module ein Stromüberschuss erzielt, der ins Netz eingespeist wurde.

Tabelle 2: Bilanzierung der elektrischen Energie der Kläranlage Emden für das Jahr 2010.

Verbrauch an elektrischer Energie gesamt:	2.224.653 kWh/a	
davon:	741.718 kWh/a	Fremdbezug
	1.482.935 kWh/a	Eigenerzeugung (BHKW)
davon:	737.419 kWh/a	aus Faulgas
	859.531 kWh/a	aus Erdgas
	114.015 kWh/a	Netzeinspeisung

Das HKW Emden verbrauchte im Jahr 2010 über 2,2 Mio. kWh elektrischer Energie. Bei 75.000 EW ergibt das mit rund 29 kWh/(EW * a) einen recht günstigen spezifischen Energiebedarf, der nur knapp über dem Zielwert liegt (vgl. Abs. 1).

Der elektrische Energiebedarf wird zu 2/3 mit dem Blockheizkraftwerk gedeckt, der Rest wird von den Stadtwerken Emden geliefert. Das BHKW wiederum wird zu ungefähr gleichen Teilen mit Faulgas und Erdgas betrieben. Demnach kann der Strombedarf zu etwa 33 % aus dem Faulgas gedeckt werden. Die spezifische Faulgasproduktion liegt bei einer jährlichen Faulgasproduk-

tion von rund 564.898 m³ bei etwa 20,6 l/(EW · d). Beide Kennwerte liegen im Vergleich zu Referenzwerten (vgl. Abs. 1) in einem guten Bereich. Der elektrische Wirkungsgrad der BHKWs liegt bei einem angenommenen Heizwert von 6,5 kWh/m³ des Faulgases (tatsächliche Zusammensetzung ist nicht bekannt) mit 20 % im unteren Bereich der heute am Markt üblichen Aggregate.

Ein Überschuss an elektrischer Energie, welcher entsteht, wenn beide BHKWs aufgrund erforderlicher Wärmeenergie in den Wintermonaten betrieben werden, wird in das Netz eingespeist (rund 114.000 kWh/a).

Der Anteil an selbst erzeugter elektrischer Energie könnte noch höher sein, wenn die ebenfalls erzeugte Wärmeenergie (die im Klärwerk nicht sinnvoll eingesetzt werden kann) an Verbraucher in der benachbarten Wohnsiedlung verkauft werden könnte. Die Realisierung dieser Pläne scheitert jedoch am baulichen und finanziellen Aufwand für den Bau einer Fernwärmeleitung und den fehlenden Interessenten für Wärmeenergie in einen bestimmten Radius um das Klärwerk Emden.

Die Simulation zeigte auf der Grundlage der bisher verfügbaren Daten mit berechneten 541.946 m³ Faulgas eine recht gute Übereinstimmung mit dem tatsächlich im Jahr 2010 an das BHKW übergebenen 564.898 m³ Faulgas [Lindenthal 2011].

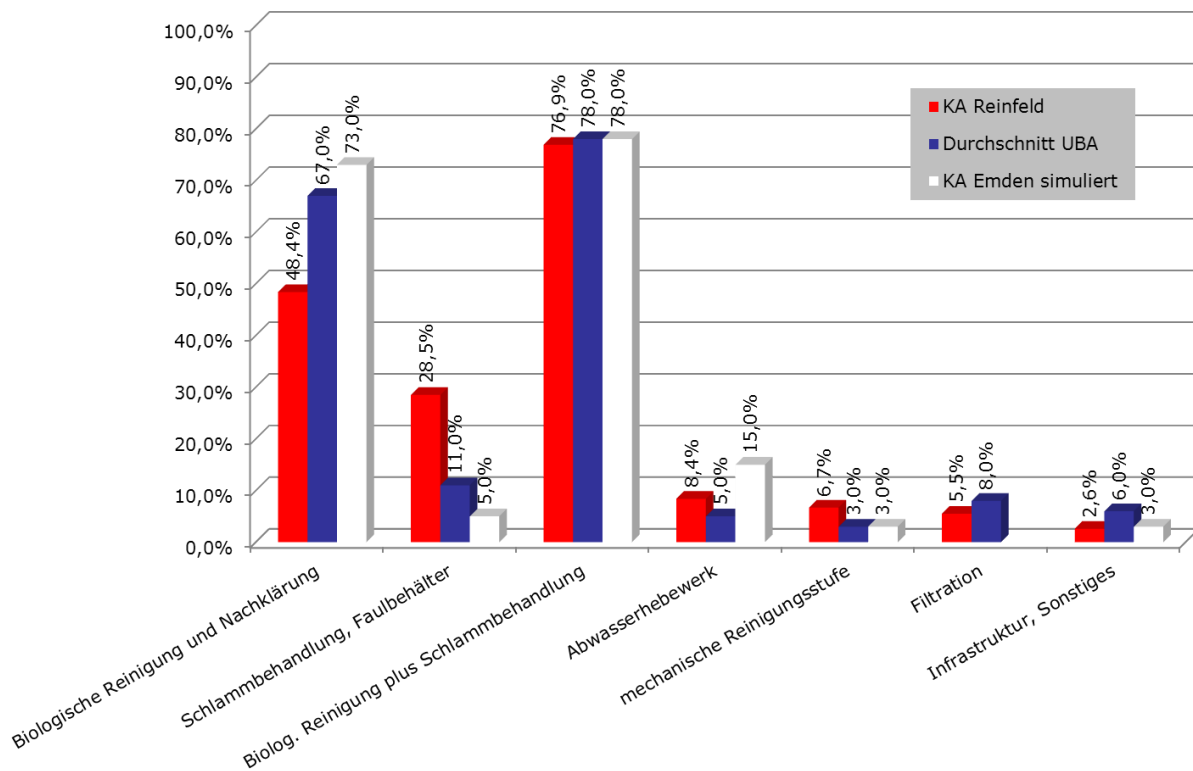


Abbildung 3: Anteile am simulierten Gesamtenergieverbrauch (ohne Schlammbehandlung) der Kläranlage Emden.

Für die Erstellung der Energiebilanz der Kläranlage Emden wurden in SIMBA Energieblöcke implementiert (vgl. hierzu Abs. 2.2.1). Der Gesamtenergieverbrauch (mit den vorhandenen Energieblöcken ohne weitere Modifikation berechnet) basiert zu 73 % auf der für die Belüftung der

Belebungsbecken erforderlichen Energie (**Abbildung 3**). Im Vergleich zu den Referenzwerten [Haber Kern et al. 2008] wäre hier ein erhebliches Einsparpotenzial zu identifizieren. Auch die Kläranlage Reinfeld hat einen deutlich geringeren Anteil des Energieverbrauchs für die biologische Reinigung. Dafür ist die Schlammbehandlung wesentlich aufwändiger. Der Anteil der Summe der Energieverbrauchswerte zur biologischen Reinigung und zur Schlammbehandlung am Gesamtenergieverbrauch der Kläranlage bleibt mit ca. 78 % für die drei Anlagen (Simulation Emden, KA Reinfeld, Durchschnitt UBA) nahezu konstant.

2.1.2 Kläranlage Reinfeld

2.1.2.1 Kenndaten

Bereits in den 1960er Jahren wurde in der Stadt Reinfeld eine zentrale Kläranlage mit mechanischer und biologischer Reinigung errichtet. Bei einem Ausbau der Anlage auf eine Ausbaugröße von 15.000 EW im Jahr 1983 wurde die biologische Stufe erweitert und eine mesophile Schlammstabilisierung sowie eine maschinelle Schlammentwässerung eingerichtet. Ferner fanden nunmehr eine simultane Phosphorelimination und eine Teildenitrifikation statt.

Nach einem Ausbau in den Jahren 1999/2000 wurde eine Belebungs-kaskade mit biologischer Phosphor-Elimination, vorgeschalteter Denitrifikations- und anschließender Nitrifikationszone eingerichtet. Ferner wurden in der mechanischen Vorbehandlungsstufe eine Sand- und Rechengutwäsche sowie ein Ausgleichsbehälter zur Pufferung hydraulischer und stofflicher Belastungsspitzen eingerichtet. Im Ablauf wurde eine Sandfiltration insbesondere für eine fakultative nachgeschaltete Phosphor-Fällung installiert.

Die Kläranlage ist im Wesentlichen an eine Trennkanalisation angeschlossen. Nur einzelne Hal-tungen befinden sich noch im Mischwasserbetrieb. Die mittlere Belastung des Rohabwasser-stromes liegt im gewöhnlichen Bereich für kommunale Kläranlagen, sodass die für die Kläran-lage Reinfeld maßgebenden Überwachungswerte in der Regel sicher eingehalten werden können (vgl. **Tabelle 3**). Die Eliminationsleistung von biochemischem und chemischem Sauerstoffbedarf (BSB₅ und CSB) sowie Gesamtphosphor und Ammonium-Stickstoff (P_{ges} und NH₄-N) liegt bei über 97 %.

Wie die Bilanzierung der Tagesfrachten (**Tabelle 4**) zeigt, wird der Großteil der organischen Fracht durch den Primär- und Überschussschlamm abgezogen. Die Denitrifikation trägt ihrer-seits naturgemäß am meisten zur Elimination der Stickstoff-Verbindungen bei.

Tabelle 3: Mittlere Konzentration der Teilströme im Zu- und Ablauf zur Vorklärung sowie Ablaufwerte im Vergleich zu den maßgebenden Überwachungswerten für die Kläranlage Reinfeld.

Parameter	mittlere Belastung [mg/l]			Überwachungswert [mg/l] ^{*2)}	Eliminationsleistung [%]
	Zulauf VK (Juli bis Dez 2010)	Ablauf VK (Jan bis Dez 2010)	Ablauf (Jan bis Dez 2010)		
BSB₅	313 ± 110	212 ± 84	1,8 ± 1,0	15	99,4
CSB	983 ± 213	667 ± 151	30,4 ± 6,3	55	96,9
P_{ges} (aus unfiltrierter Probe)	14,0 ± 3,9	11,7 ± 2,5	0,23 ± 0,10	0,8	98,4
N_{ges,anorg} (NH ₄ + NO ₂ + NO ₃)	93,6 ± 27,6	91,9 ± 15,9	12,0 ± 4,4 ^{*1)}	10,0	87,2
NH₄-N	63,4 ± 17,1	64,3 ± 13,9	1,33 ± 2,40	--/--	97,9

^{*1)} Ablaufwerte für gesamten, anorganischen Stickstoff sind im Jahresmittel aufgrund einer Betriebsstörung im Frühjahr überhöht.

^{*2)} Neben den Werten aus der Rahmen-Abwasser-Verwaltungsvorschrift (RahmenAbwVwV, Anhang 1) gelten Anforderungen gem. des Abwasserbeseitigungsplan Trave vom 08.12.1987 (MELF VIII 250b/5240.42)

Ein mittlerer, täglicher Mischwasserzufluss von etwa 1.580 m³/d (Medianwert) entspricht einer mittleren Tagesfracht von knapp 500 kg BSB₅/d (etwa 8.300 EW). Das 85 %-Quantil der Tageswerte, an denen bei Trockenwetterabfluss eine tägliche einwohnerspezifische Fracht von 60 g BSB₅/(E · d) unterschritten wurde, lag im gleichen Zeitraum bei knapp 11.000 EW (tatsächliche Anschlussgröße). Als Ausbaugröße für die letzte Erweiterung in den Jahren 1999/2000 wurde ein Wert von 24.500 EW zugrunde gelegt.

Der Kläranlage Reinfeld gehen nach Niederschlagsereignissen, obwohl sie an eine Trennkanalisation angeschlossen ist, erhöhte Zuflüsse infolge des Fremdwasseranfalls zu. Als Folge des Fremdwassers weist das Rohabwasser dann relativ geringe Konzentrationen auf. Eine weitere Folge sind erhöhte Pump- und Belüftungsleistungen.

Ein im Verhältnis zu CSB und P_{ges} geringer BSB₅ im Kläranlagenzulauf (bzw. im Ablauf der Vorklärung) spiegelt sich während des Betriebes in der zeitweise fehlenden Kohlenstoffquelle wider, welche für eine sichere Denitrifikation erforderlich wäre. Aus diesem Grund wird der anaeroben Beckenzone bei Bedarf eine externe Kohlenstoffquelle (Co-Substrat: Essigsäure) zugegeben.

Die aktuellen Kennzahlen zeigen, dass die Kläranlage gemessen sowohl an der hydraulischen als auch an der stofflichen Belastung deutlich überdimensioniert ist. Indirekt spiegelt sich diese Überdimensionierung u. a. im hohen spezifischen Energiebedarf wieder (s. u., Kap. 2.1.2.3).

Tabelle 4: Bilanzierung der Tagesfrachten für die Kläranlage Reinfeld (gasförmige Austräge aus Differenzbildung).

Bilanzierung der Tagesfrachten [kg/d]								
Parameter	Rohabwasser	Zentrat	Ablauf Filtration	Oxidation/ Denitrifikation	Primärschlamm	Überschuss-Schlamm	Bilanz	Fehler ¹
CSB	+1,667	+10	-52	-552	-576	-457	+40	2.4%
BSB ₅	+568	+2	-3	-200	-203	-164	+0	0.0%
N	+153	+22	-19	-126	-7	-22	+1	0.7%
P	+24.0	+0.8	-0.3		-5.0	-18.5	+1	4.2%

¹ Prozentualer Anteil der verbleibenden Tagesfracht an der Tagesfracht im Zulauf

2.1.2.2 Verfahrensschema

Anlage 2 zeigt das Verfahrensschema der Kläranlage Reinfeld. Zurzeit ist kein zentrales Prozessleitsystem installiert, welches eine integrierte Erfassung von Volumen- und Stoffströmen, Betriebsstunden oder des Energieverbrauchs ermöglichen würde. Messtechnisch ist die Anlage mit wenigen online-Sonden ausgestattet, die in der Regel jeweils einem bestimmten Steuerungskreislauf zugeordnet sind.

Das Zulaufpumpwerk ist mit drei Kreiselpumpen ausgestattet, von denen zwei frequenzgeregelt zur Absicherung der Grundlast vorgehalten werden (Nennleistung je $P_N = 18,5$ kW). Beide Pumpen werden wechselweise betrieben. Einschließlich einer dritten Pumpe ($P_N = 30$ kW), die lediglich bei großen Zuflüssen benötigt wird, hat das Zulaufpumpwerk eine hydraulische Leistungsfähigkeit von bis zu $500 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einer geodätischen Förderhöhe von $H_{\text{geo}} = 9,0$ m. Die Steuerung des Zulaufpumpwerkes erfolgt dezentral über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) in Abhängigkeit des Füllstandes im Vorlagebehälter. Die Drehzahl wird mit einem Frequenzumrichter (FU) frequenzgeregelt.

Die mechanische Vorreinigung ist mit zwei wechselweise betriebenen Trommelsieben mit integrierter Rechengutwäsche und anschließender Rechengutpresse ausgestattet. Nur bei großen Zuflüssen werden beide Trommelsiebe parallel betrieben. Anschließend wird das Rohabwasser einem belüfteten Rundsandfang (tangentiale Anströmung) zugeführt (Volumen $8,5 \text{ m}^3$). Der über eine Mammutpumpe abgezogene Sand wird in einem Sandwäscher gereinigt und anschließend in einer Spiralpresse entwässert. Die Rechengut- und Sandwäsche erfolgt mit Brauchwasser, welches aus dem Ablauf der Sandfilter abgezogen wird und anschließend in den Vorlagebehälter des Zulaufpumpwerkes geleitet wird. Der gewaschene Sand ($< 10 \text{ m}^3/\text{a}$) wird gemeinsam mit dem Rechengut (ca. $65 \text{ m}^3/\text{a}$) einer Deponie zugeführt.

Dem Sandfang folgend wird das Rohabwasser der Grobentschlammung/Vorklärung zugeführt ($V = 150 \text{ m}^3$; Aufenthaltszeit im Mittel etwa $2,0$ h bei Trockenwetterabfluss). Der Abzug des Primärschlammes erfolgt manuell durch das Öffnen eines Schiebers. Der Primärschlamm wird sodann dem Faulschlamm-Vorlagebehälter zugeleitet, bevor er in den Faulbehälter gepumpt wird.

Das Gerinne zwischen Sandfang und Grobentschlammung ist mit einem Streichwehr ausgestattet, welches bei Abflüssen von mehr als $300 \text{ m}^3/\text{h}$ aktiviert wird. Zwei Kreiselpumpen (je

$P_N = 5,5 \text{ kW}$) fördern das überschüssige Rohabwasser im Bedarfsfall in einen Misch- und Ausgleichsbehälter (MAB, $V = 1.050 \text{ m}^3$).

Dieser dient zum einen der hydraulischen Entlastung der biologischen Reinigungsstufen, aber auch zur Verdünnung des nitrathaltigen Zentrats aus der Schlammbehandlung, welches aufgrund der Betriebsweise intermittierend anfällt und hier zwischengespeichert wird.

Durch einen Überlauf ist der MAB mit einem weiteren Ausgleichsbehälter (AB, ebenfalls $V = 1.050 \text{ m}^3$) verbunden. Bei sehr lang anhaltenden Regenfällen und/oder großen Zuflüssen steht als letzte hydraulische Pufferzone ein Havarie-Becken mit einem Volumen von 770 m^3 (ausgeführt als Erdbecken) bereit. Sowohl im MAB als auch im AB ist jeweils ein Rührwerk mit einer Nennleistung von $P_N = 3,5 \text{ kW}$ installiert. Da im MAB stets ein bestimmtes Wasservolumen gespeichert ist, wird das entsprechende Rührwerk durchgehend betrieben. Insbesondere in den Nachtstunden – während einer geringen hydraulischen Belastung – wird das in den Ausgleichsbehältern gespeicherte Rohabwasser (welches mit dem nitrathaltigen Zentrat der Schlammbehandlung vermischt ist) über einen Mengemess-Schacht in die anoxische Zone der Belebungs-kaskade abgelassen. Die Steuerung erfolgt über elektrisch verstellbare Schieber und eine magnetisch-induktive Durchflussmessung (IDM) in Abhängigkeit der Beschickungsrate der Belebungs-kaskade (Zulauftrate und hiervon abhängig die interne Rezirkulationsrate).

Der Grobentschlammung folgend, wird mittels einer Gefälleleitung der Vorlagebehälter des Rohabwasserpumpwerkes beschickt. Über zwei Kreiselpumpen (je $P_N = 4 \text{ kW}$; $H_{geo} = 4,5 \text{ m}$) wird das Rohabwasser der anaeroben Zone der Belebungs-kaskade zugeführt. Im Bedarfsfall kann der Misch- und Ausgleichsbehälter zur Verdünnung des nitrathaltigen Zentrats aus der Schlammbehandlung über eine dritte Kreiselpumpe ($P_N = 7,5 \text{ kW}$; etwa $H_{geo} = 11 \text{ m}$, abhängig vom Wasserstand) beschickt werden. Die Steuerung aller drei Pumpen erfolgte anhand einer dezentralen SPS über die Messung des Wasserstandes im Vorlagebehälter und der Größe des Kläranlagen-zulaufs.

Die Belebungs-kaskade gliedert sich in eine anaerobe Beckenzone im Zulaufbereich, welcher in erster Linie der biologischen Phosphorelimination dient, einen anoxischen Beckenbereich zur vorgeschalteten Denitrifikation sowie eine anschließende aerobe Beckenzone zur Nitrifikation. Beide parallele Straßen der Kaskade haben ein Volumen von je 1.200 m^3 (je $2 \times 600 \text{ m}^3$ für die anaerobe und aerobe Beckenzone und $2 \times 1.200 \text{ m}^3$ für die anoxische Beckenzone).

Der Zulauf der anoxischen Zone wird mit dem Rohabwasser, dem Rücklaufschlamm sowie dem Ablauf des Misch- und Ausgleichsbehälters beschickt. Im Bedarfsfall bei nicht ausreichender Kohlenstoffquelle kann hier die Zugabe eines Co-Substrates (z. Zt. Essigsäure) erfolgen.

In der Belebungs-kaskade sind insgesamt acht Rührwerke (je $P_N = 0,9 \text{ kW}$) installiert (je zwei in anaerober und aerober Zone und vier in der anoxischen Zone). Bis auf die beiden Rührwerke in der aeroben, belüfteten Beckenzone werden alle durchgehend betrieben.

Am Übergang vom anaeroben zum anoxischen Beckenbereich wird das nitrathaltige Kreislaufwasser zugeführt. Zur Nitrifikation wird in der aeroben Beckenzone Luft über Membranschläuche eingeblasen (je drei Verdichter pro Straße, je $P_N = 18,5 \text{ kW}$). Die Steuerung der Belüftung erfolgt frequenzgeregelt über eine Sauerstoff-Einpunkt-Messung in der aeroben Zone anhand einer SPS in vorgegebenen Grenzen. Im turbulenten Auslaufbereich der Kaskade wird ein eisenhaltiges Fällmittel zur simultanen Phosphorfällung zugegeben.

Der Belebtschlamm mit einem Trockensubstanzgehalt von $TS = 3,7 \pm 0,7 \%$ wird aus der aeroben Zone der Belebungs-kaskade in eine weitere aerobe Beckenzone geleitet. Die bereits vor dem letzten Umbau im Jahr 1999 vorhandenen beiden Rundbecken werden weiterhin zur Nitrifikation genutzt. Entsprechend des unterschiedlichen Volumens beider Becken (600 und 240 m^3) teilt sich der Abfluss des Belebtschlammes aus der Belebungs-kaskade in einem Abschlagbauwerk in zwei Teilströme von 28 bzw. 72% . Die Belüftung beider Rundbecken wird anhand einer einzigen Sauerstoffmessung im größeren Becken ebenfalls mittels einer SPS in definierten Grenzen frequenzgeregelt gesteuert (zusammen zwei Verdichter, je $P_N = 18,5 \text{ kW}$, einer hiervon wird zur Reserve vorgehalten). Nur das größere Becken verfügt über zwei Rührwerke ($P_N = 0,9$ bzw. $1,25 \text{ kW}$), die durchgehend betrieben werden. Aus den beiden Rundbecken wird über insgesamt vier Kreiselpumpen das Kreislaufwasser abgezogen und der anoxischen Zone der Belebungs-kaskade zugeführt (interne Rezirkulationsrate ca. $6,5$). Die Pumpen haben entsprechend der Größe der Rundbecken und der anteiligen Volumenströme unterschiedliche Nennleistungen ($2 \times P_N = 4,28 \text{ kW}$ und $2 \times P_N = 7,78 \text{ kW}$; $H_{\text{geo}} = 1,1 \text{ m}$).

Über Dükerleitungen wird der überschüssige Belebtschlamm in die beiden Nachklärbecken geführt. Beide Nachklärbecken haben entsprechend der unterschiedlichen hydraulischen Belastung der beiden Rundbecken ebenfalls ungleiche Volumina ($V = 1069$ bzw. 385 m^3). Dem Zulauf zum größeren Nachklärbecken wird intermittierend das Spülwasser aus der Sandfiltration des Klarwassers zugegeben. Mit insgesamt vier alternierend betriebenen Kreiselpumpen ($2 \times P_N = 1,1 \text{ kW}$; $2 \times P_N = 2,8 \text{ kW}$; $H_{\text{geo}} = 1,1 \text{ m}$) wird der Rücklaufschlamm (Rücklaufverhältnis $1,8$) in die anaerobe Zone der Belebungs-kaskade gefördert. Eine weitere Pumpe ($P_N = 0,7 \text{ kW}$; $H_{\text{geo}} = 2,5$ bis $5,0 \text{ m}$, abhängig vom Füllstand) fördert den Überschussschlamm in den Vorlagebehälter der maschinellen Eindickung.

Das Klarwasser aus den beiden Nachklärbecken gelangt über eine Gefälleleitung in einen Vorlagebehälter. Von diesem fördern zwei Wasserstands abhängig frequenzgeregelt Kreiselpumpen ($2 \times P_N = 2,4 \text{ kW}$; $H_{\text{geo}} = 5,4 \text{ m}$) das Klarwasser in die insgesamt fünf Sandfilter (Filterfläche $5 \times 5 \text{ m}^2$) zur Flockungsfiltration. Von den insgesamt fünf aufwärts durchströmten Filtern werden wechselweise bis zu vier parallel betrieben. Die Gesamtphosphor-Konzentration im Ablauf wird online mit einem Analyseautomaten überwacht. Der Messwert dient zur Steuerung der Fällmittel-Zugabe. Die Messung des Filterwiderstandes dient der fakultativen Rückspülung einzelner Filter. Das Klarwasser wird als Brauchwasser u. a. für die Rechengut- und Sandwäsche genutzt.

Der aus der Nachklärung abgezogene Überschussschlamm mit einem Trockensubstanzgehalt von $TS = 5,9 \pm 1,4 \%$ wird mittels einer Exzentrerschneckenpumpe ($P_N = 7,5 \text{ kW}$) aus dem Vorlagebehälter (ständig betriebenes Rührwerk, $P_N = 3 \text{ kW}$) abgezogen und auf einer Siebbandpresse (Fab. Bellmer, $P_N = 0,75 \text{ kW}$), die intermittierend betrieben wird, entwässert. Das nitrathaltige Zentrat wird gemeinsam mit dem Zentrat aus der dem Faulbehälter nachgeschalteten Zentrifuge dem Misch- und Ausgleichsbehälter zugeführt und dann intermittierend in die anaerobe Zone der Belebungs-kaskade abgelassen.

Der nunmehr entwässerte Dickschlamm wird in einen weiteren Vorlagebehälter gepumpt (Exzentrerschneckenpumpe, $P_N = 5,0 \text{ kW}$). Hier wird der Dickschlamm mit dem aus der Vorklärung abgezogenen Primärschlamm vermengt. Täglich werden rund 20 m^3 Faulschlamm mit einem Trockensubstanzgehalt von $TS = 2,5 \pm 0,2 \%$ (Glührückstand $GR = 38,1 \pm 1,3 \%$) in den Faulbehälter gefördert (Dimensionierung: $42 \text{ m}^3/\text{d}$; $TS = 4,6 \%$; $GR = 30 \%$).

Zwei weitere, intermittierend betriebene Exzentrerschneckenpumpen (je $P_N = 4,0 \text{ kW}$) fördern den Dickschlamm in den Impfmischer des Faulbehälters. Nachdem der Dickschlamm mit dem Umwälzschlamm vermischt wurde, wird er dem Wärmetauscher zugeführt und schließlich in den Faulbehälter geleitet. Zur Umwälzung dienen zwei kontinuierlich betriebene Umwälzpumpen (Exzentrerschneckenpumpen, je $P_N = 4,0 \text{ kW}$). Eine interne Umwälzung wird über ein Rührwerk ($P_N = 5,9 \text{ kW}$) im Inneren des Faulbehälters gewährleistet. Die theoretische Aufenthaltszeit des Faulschlammes im 800 m^3 fassenden Faulbehälter liegt bei der o. g. Beschickungsrate bei rund 40 Tagen. Der Faulbehälter wird mittels des erzeugten Faulgases (CO_2 -Gehalt i. M. 30 %) auf etwa 35 bis 37°C aufgeheizt. Möglicherweise anfallendes überschüssiges Gas wird über eine Gasfackel verbrannt.

Der ausgefaulte Schlamm gelangt über eine Gefälleleitung in den Vorlagebehälter ($V = 250 \text{ m}^3$) für die Schlammmentwässerung. Der Vorlagebehälter ist mit einem kontinuierlich betriebenen Rührwerk ($P_N = 3,0 \text{ kW}$) ausgestattet. Eine Exzentrerschneckenpumpe ($P_N = 2,0 \text{ kW}$) fördert den Faulschlamm von diesem in einen Zentrifugendekanter (Trommel- und Schneckenmotor, $P_{\text{Nges}} = 27,5 \text{ kW}$). Anschließend wird der Schlamm mit zwei Spiralpressen (je $P_N = 3,0 \text{ kW}$) weiter entwässert. Der etwa zweimal wöchentlich entwässerte Schlamm wird vor der Deponierung der thermischen Verwertung zugeführt.

2.1.2.3 Energiebilanz

Im Jahr 2010 lag der externe Strombezug bei insgesamt etwa 770.000 kWh/a. Der spezifische Energiebedarf liegt mit $70 \text{ kWh}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ deutlich über den üblichen Toleranzwerten für die Größenklasse GK4 (vgl. Abs. 1). Das anfallende Faulgas wird zur Erwärmung des Faulbehälters genutzt. Im Bedarfsfall wird zusätzlich Erdgas zur Beheizung verwendet. Eine Verstromung des Faulgases erfolgt bisher nicht. Die Installation eines BHKW ist geplant.

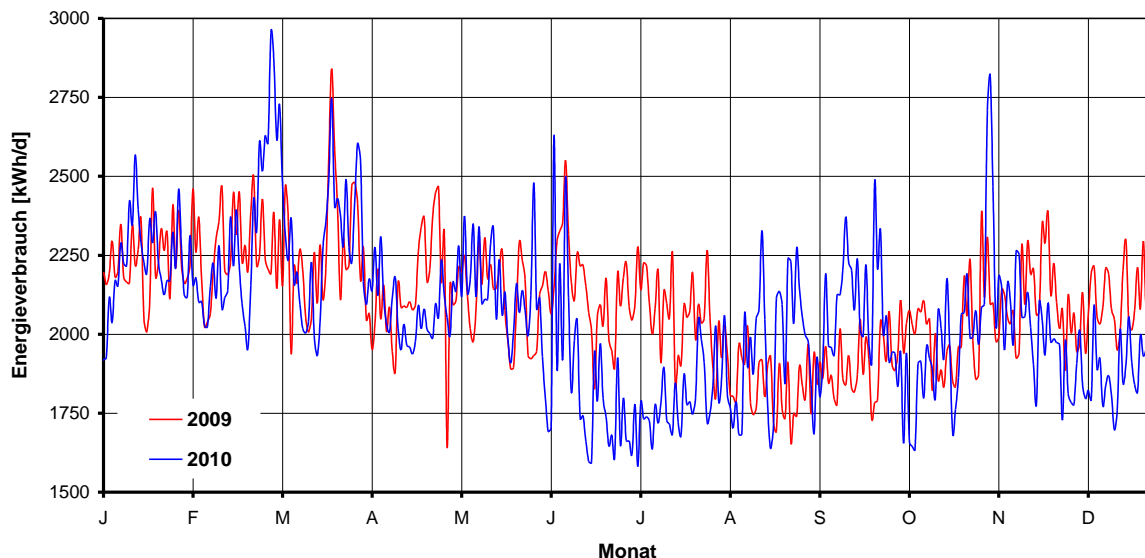


Abbildung 4: Jahreslastgang für den Stromverbrauch der Kläranlage Reinfeld (2009 und 2010; Tageswerte).

Wie **Abbildung 4** zu entnehmen ist, liegt der Stromverbrauch in den Wintermonaten um etwa 10 % über den Sommermonaten. Die Gründe hierfür sind in den erhöhten Niederschlägen während der Wintermonate und dem damit verbundenen höheren Fremdwasseranfall sowie in den kühleren Temperaturen und der damit verbundenen schlechter funktionierenden Belebungsstufe zu suchen. Letztere dürfte höhere Gebläse- und Pumpleistungen zur Folge haben. Ein weiterer Aspekt, wenn auch untergeordnet, dürfte eine verstärkte Beleuchtung in den Wintermonaten sein.

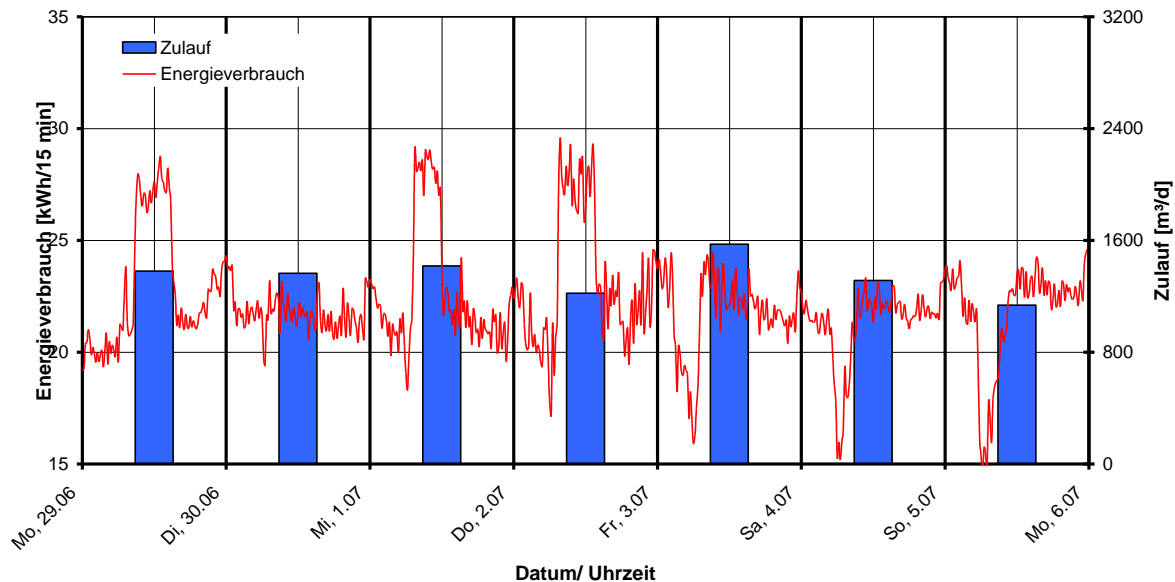


Abbildung 5: Wochentägliche Abhängigkeit des Energiebedarfs bei Trockenwetterabfluss.

Der wochentägliche Energiebedarf (**Abbildung 6**) zeigt in der Regel eine mittägliche Verbrauchsspitze, welche vor Allem auf die betrieblichen Umstände (Betrieb der Schlammabtrennung und -eindickung, Betrieb von Brauchwasserpumpen, Beleuchtung, etc.) und höhere Zulaufmengen zurückzuführen ist. Ein nächtliches Verbrauchstief an den Wochenenden resultiert vor Allem aus den geringeren Zulaufmengen.

Eine deutliche Abhängigkeit des Stromverbrauchs lässt sich von der Niederschlagshöhe ausmachen, wie **Abbildung 6** exemplarisch für eine Woche im Juli zeigt. Der infolge des Niederschlags der Kläranlage zugehende Fremdwasseranfall führt zu einer erforderlichen verstärkten Pump- und Belüftungsleistung.

Die Energiebilanz der Kläranlage wurde anhand der unter Abs. 2.2.2 und 2.2.3 erläuterten Methoden erstellt. Wie der **Abbildung 7** zu entnehmen ist, weicht vor allem der Anteil der Schlammbehandlung einschließlich des Faulbehälters (28,5 %) von Referenzwerten (11 %) ab (vgl. hierzu Abs. 1). Da die übrigen Anteile (Filtration, Abwasserhebwerk, mechanische Reinigungsstufe, Infrastruktur) sich kaum von den Vergleichswerten unterscheiden, ist hieraus der verhältnismäßig geringe Anteil für die biologische Stufe einschließlich der Nachklärung zu erklären.

Das Ergebnis der Grobanalyse für die Kläranlage Reinfeld verdeutlicht, dass der Anteil der Belüftungskaskade mit rund 43 % des Gesamtstromverbrauchs einen relativ geringen Anteil am Gesamtenergiebedarf hat. Lediglich die Kreislaufwasserpumpen (Rezirkulationsrate 6,5) weisen

einen hohen Anteil (rund 17 %) auf. Hier lässt sich ein deutliches Optimierungspotenzial ausmachen, falls etwa auf Basis einer verbesserten Betriebsführung die Rezirkulationsrate gesenkt werden könnte.

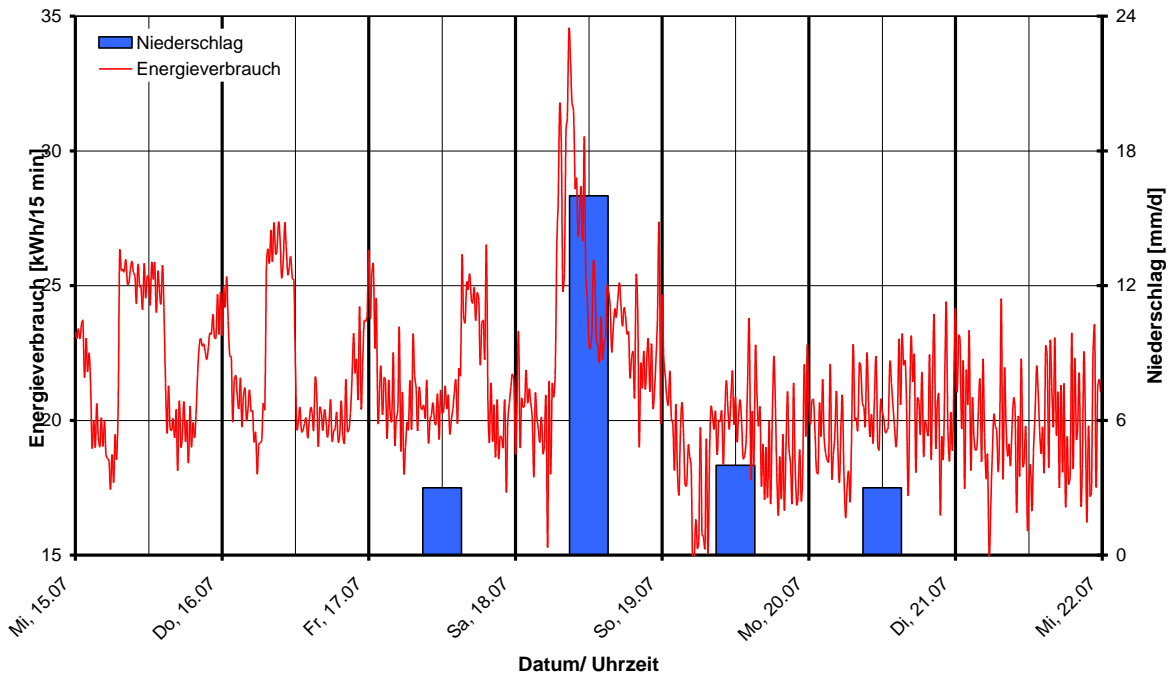


Abbildung 6: Exemplarischer Zusammenhang zwischen Niederschlagshöhe und Energieverbrauch.

Topografisch bedingt (Förderhöhe 9 m, s. o.) weisen allein die Zulaufpumpen einen Anteil von 8,4 % am Gesamtstromverbrauch auf. Der übliche Lastbereich der Pumpen (20 bis 35 l/s) führt zu einem schlechten Wirkungsgrad von lediglich rund 50 %. Hier würde ein Austausch der Pumpen oder der Laufräder eine Reduzierung des Stromverbrauchs ermöglichen.

Weiteres Optimierungspotenzial lässt sich im Bereich der Schlammbehandlung und Faulung ausmachen. Vor Allem im Bereich des Faulturms (Umwälzpumpen und Rührwerk) könnte in einem ersten Schritt durch den Einsatz von Aggregaten mit verbessertem Wirkungsgrad die Effizienz deutlich gesteigert werden.

Die topografische Situation, die hohe Rezirkulationsrate, z. T. veraltete Pumpentechnik sowie die baulich bedingten Randbedingungen (z. B. zweimaliges Heben des Rohabwassers vor Eintritt in die Belebungs-kaskade) führen dazu, dass auf der Kläranlage Reinfeld die Pumpen einen Anteil von knapp 50 % am Strombedarf haben. Den Gebläsen der biologischen Stufe kommt ein Anteil von lediglich rund 19 % zu. Üblicherweise liegt dieser Anteil bei Kläranlagen mittlerer Größenordnung in einem Bereich von 50 %. Dass dieser Anteil für die Kläranlage Reinfeld gering ausfällt, liegt weniger an der effektiven Belüftung, als vielmehr an dem übermäßigen Anteil des Pumpenbedarfs.

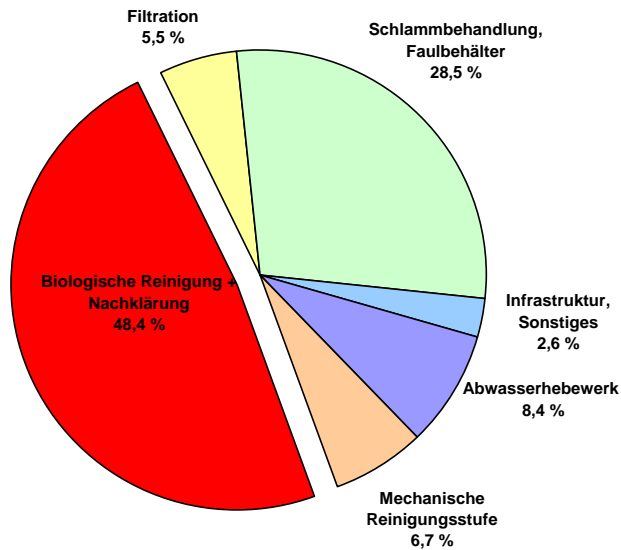


Abbildung 7: Anteile am Gesamtstromverbrauch der Kläranlage Reinfeld (2010).

Insgesamt lässt sich verfahrenstechnisch vor Allem im Bereich der Kreislaufwasserführung und in der Schlammbehandlung Einsparpotenzial erkennen. Demgegenüber unbenommen bleiben Einsparpotenziale, welche auf der Ausnutzung technischer Überholung beruhen.

Jährlich werden etwa 132.000 m³ Faulgas produziert. Die spezifische Faulgasproduktion liegt somit mit knapp 33 L/(EW · d) deutlich über den Referenzwerten. Bei einem angenommenen Heizwert von 6,5 kWh/m³ und einem elektrischen Wirkungsgrad von 30 % ließen sich demnach etwa 257.400 kWh elektrischer Energie in einem BHKW erzeugen. Ein Eigenversorgungsgrad von rund 33 % wäre möglich.

2.1.3 Versuchs- und Ausbildungskläranlage (VAK)

Bei der Versuchs- und Ausbildungskläranlage (VAK) handelt es sich um eine Anlage im halbertechnischen Maßstab, die mit vorgeklärtem kommunalem Abwasser der benachbarten Kläranlage Reinfeld beschickt wird. Die Anlage besteht aus verschiedenen Modulen, die in verschiedener Anordnung zueinander kombiniert werden können und ermöglicht so eine flexible Verfahrensweise mit der sich verschiedene Prozesse und Anordnungen realisieren und untersuchen lassen. Im Regelfall wird die Anlage nach dem Belebtschlammverfahren mit vorgeschalteter Denitrifikation betrieben (**Abbildung 8**).

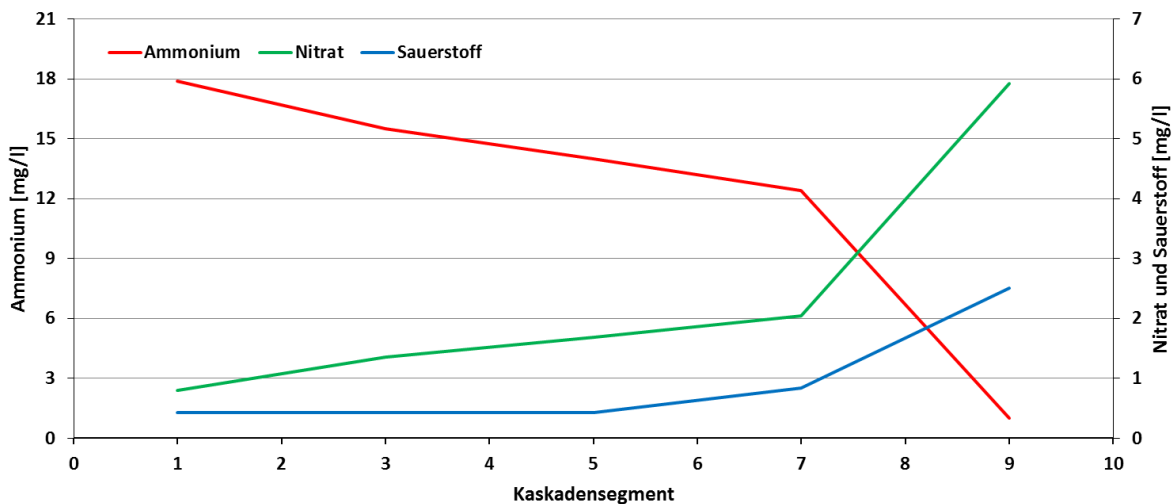


Abbildung 8: Typischer Verlauf der Ammonium-, Nitrat- und Sauerstoffkonzentration in der 10-stufigen Kaskade.

Ein wesentlicher Aspekt ist, dass der Ablauf der VAK wieder der kommunalen Kläranlage zugeführt wird und insofern keine zwingende Reinigungsnotwendigkeit besteht. Dadurch lassen sich auch Szenarien wie Störfälle oder Stromausfälle simulieren und messtechnisch erfassen.

Die VAK bietet die Möglichkeit die Verfahrensabläufe der KA Reinfeld und der KA Emden bei vergleichbarer Reinigungsleistung abzubilden. Sie ist auf einen Durchfluss von etwa 1 m³/h ausgelegt. Eine Bewertung der VAK unter energetischen Aspekten ist aufgrund der Anlagengröße nicht sinnvoll.

2.1.3.1 Verfahrensschema

Abbildung 9 zeigt das Verfahrensschema der VAK. Eine online-Messtechnik ist bisher nicht installiert. Die VAK wird mit Abwasser aus dem Ablauf der Vorklärung der kommunalen Kläranlage Reinfeld beschickt. Der Vorlagebehälter besteht aus zwei getrennten Becken (je etwa 0,64 m³), die separat beschickt werden können. Es ist je ein Rührwerk (Fab. Nord, Typ SK 71L/4) mit einer Nennleistung von 0,37 kW installiert. Beide Becken sind mit einem Schlammabzug ausgestattet, welcher den Abzug von Primärschlamm erlauben würde, wenn der Vorlagebehälter als Vorklärung betrieben würde. Zur Beschickung der Belebungs-kaskade ist eine Exzenter-schneckenpumpe (KSB Getec; Typ N 50) installiert. Der Durchfluss wird mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmessgerät (Typ Proline promag 50) gemessen.

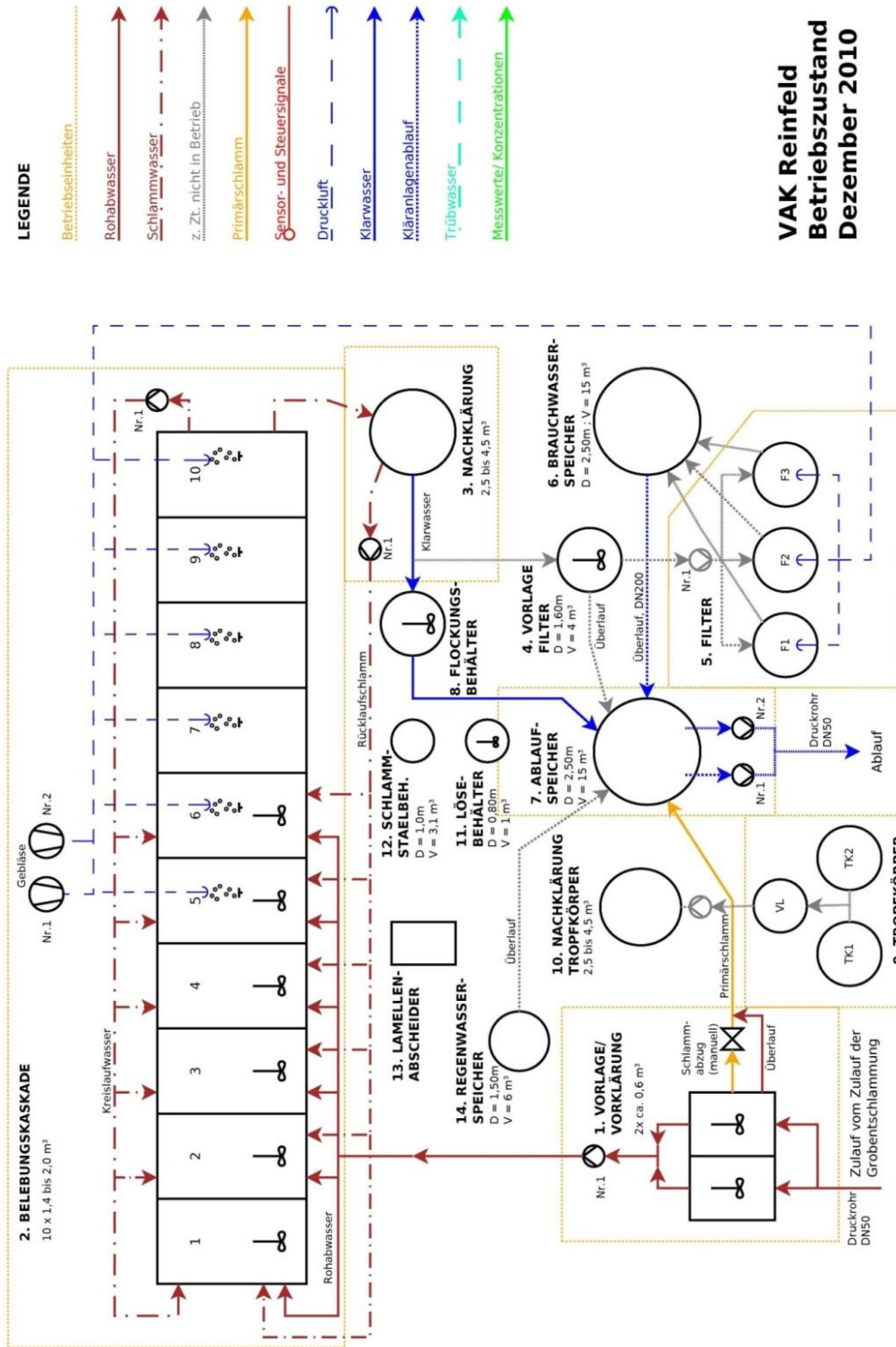


Abbildung 9: Verfahrensschema der VAK (Ist-Zustand).

Die Belebungs-kaskade besteht aus zehn Segmenten á 1,4°-2,0°m³, je nach Überfallhöhe der Nachklärung, wovon sechs mit Rührwerken (Fab. Nord, Typ SK 71L/4, Nennleistung 0,37 kW) ausgestattet sind und ebenfalls sechs mit Belüfterkerzen, die von einem Gebläse der Fa. Aerzen

(Typ GM 3 S) mit Luft beschickt werden. Aufgrund der variablen Konfiguration ist es möglich die interne Rezirkulation (Kreislaufwasser) und den Rücklaufschlamm wahlweise in eines der vorderen sechs Becken zurück zu führen. Aufgrund der oben genannten Anzahl von Segmenten mit Rührwerken und Belüfterkerzen sind die Segmente 5 und 6 jeweils mit beiden Komponenten ausgestattet, die sich darüber hinaus in jedem Segment zu- und abschalten lassen. Sowohl Kreislaufwasser als auch Rücklaufschlamm können mittels Exzentrerschneckenpumpen (KSB Getec, Typ L 50) in eines der ersten sechs Segmente zurückgeführt werden. Beide Volumenströme werden ebenfalls über eine magnetisch-induktive Durchflussmessung erfasst.

Die Nachklärung (vertikal durchströmtes Rundbecken) wird mittels einer Dükerleitung aus dem letzten Segment der Belebungs-kaskade beschickt. Da die Überfallkante der Nachklärung in der Höhe variabel ist, kann das Volumen der Kaskade als auch der Nachklärung (2,5 bis 4,5 m³) variiert werden.

2.2 Möglichkeiten zur Bestimmung des Energiebedarfs

Verschiedene Methoden zur Bestimmung des Energiebedarfs einzelner Aggregate bzw. Anlagenteile wurden untersucht. Neben der Implementierung eines Energieblocks in SIMBA[®] wurde die Bestimmung anhand mittlerer Volumenströme auf Grundlage der Leistungskennlinie durchgeführt. Im Weiteren wurde die Messung mit Hilfe von Stromzangenamperemetern untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass sich aus der Kombination aller Methoden Energieblöcke definieren lassen, welche eine recht exakte Abbildung des Stromverbrauchs erlauben und somit als Basis für die Simulation eines Energieminimums dienen können.

Zur Beurteilung des Energiebedarfs einer bestimmten Kläranlage bzw. einzelner Anlagenteile wird in der Regel zunächst eine Grobanalyse durchgeführt, welcher im Bedarfsfall eine Feinanalyse folgt. In der Grobanalyse werden zunächst der Ist-Zustand der Kläranlage und der Energiebedarf nach Verbrauchertypen und Anlagenteilen aufgeschlüsselt. In der Feinanalyse werden vertieft Optimierungsmaßnahmen untersucht und in einem Maßnahmenkatalog mit Empfehlungen für eine kurzfristige und eine langfristige Realisierung zusammengefasst. Notwendige Voraussetzung zur Durchführung dieser Untersuchungen sind neben der Kenntnis der üblichen wasserchemischen und betrieblichen Parameter, Kenndaten über den Energieverbrauch der Gesamtanlage sowie einzelner Verfahrensstufen. Idealerweise liegen im Vorfeld einer solchen Untersuchung auch die tatsächlichen Betriebsstunden einzelner Aggregate vor. Gerade bei kleinen Kläranlagen, bei denen häufig noch kein zentrales Prozessleitsystem integriert ist, liegen diese Daten häufig nicht in entsprechendem Umfang vor. Daher gestaltet sich die Datenerhebung und mithin eine Beurteilung der Energiebilanz in der Praxis häufig als schwierig.

2.2.1 Simulation in SIMBA[®]

Zur Bestimmung des Energiebedarfs einzelner Aggregate bzw. Anlagenteile wurden in die Simulationssoftware SIMBA[®] Energieblöcke implementiert, mit denen der Stromverbrauch (bzw. im Falle des BHKW die Stromerzeugung) abgebildet werden kann.

Für die Simulation wurden Daten zum Abwasser an verschiedenen Stellen der Abwasserbehandlung in Labormessungen ermittelt (NH₄⁺, NO₃⁻, O₂; Daten zum Tagesgang: CSB (COD), TKN (org. N), Durchflussmenge Q; **Abbildung 10**). Weiterhin wurden die Daten der online-Messung

in den Belebungsbecken (Redox-Potenzial, NH_4^+ , O_2 ; bzw. NO_3^- , NH_4^+ , O_2) und die entsprechende Gebläse-Leistung zur Simulation herangezogen.

Mit diesem Datensatz wurde die Kläranlage Emden mit der Simulationssoftware SIMBA[®] nachgebildet. Hierzu musste zunächst das bereits vorhandene SIMBA 5 Modell auf die neue Programmversion SIMBA 6 umgestellt und aktualisiert werden.

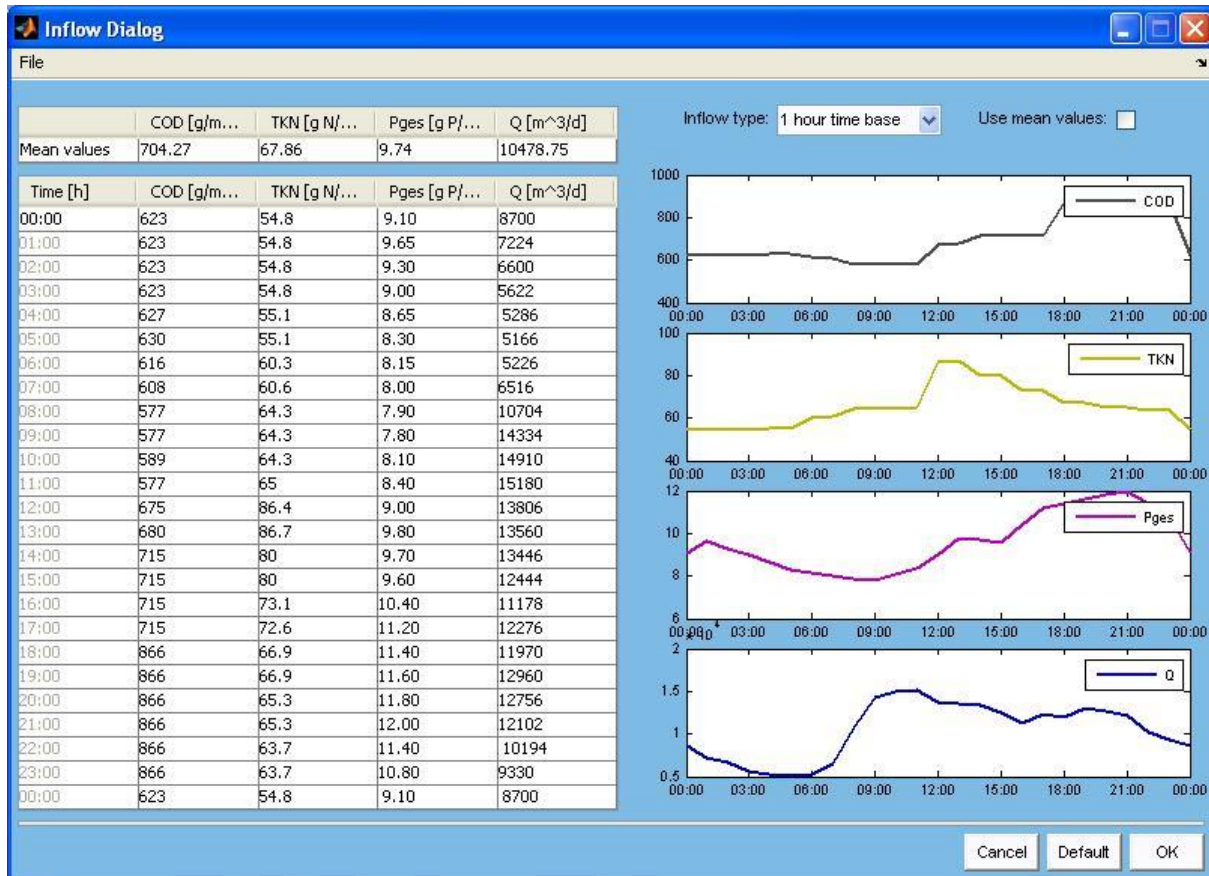


Abbildung 10: Tagesgang des HKW Emden.

Die Emdener Kläranlage wurde mithilfe der Daten aus der Verbraucher-Erfassung und den Labormessungen simuliert. **Abbildung 11** zeigt den Aufbau des Modells: Zu Beginn der Modellierung wird der Tagesgang mit Durchfluss-Werten und Konzentration der verschiedenen Parameter eingegeben.

In einem Konverter-Block werden die erfassten Daten in die 13 Datensätze für die Stoffgruppen des ASM3 (Activated Sludge Model No.3) sowie den Volumenstrom umgerechnet. Weiterhin wird der Energieverbrauch der Pumpen des Hebewerks abhängig vom Tagesgang berechnet und ausgegeben. Zur Kontrolle werden die Zugangsdaten ausgegeben.

Es folgt ein Teiler, der den Abwasserstrom auf die beiden Straßen aufteilt. Da beide Straßen in erster Näherung identisch sind, wird nur eine Straße simuliert. Das Vorklärbecken schließt sich an mit Angaben zum Volumen und dem täglichen Primärschlamm-Abzug. Danach folgt ein Teiler, der 20 % des Abwasserstroms als Kohlenstoff-Quelle in Zone II des Belebungsbeckens leitet, während 80 % des Abwasserstroms in Belebungszone 1 geleitet werden. Über eine Zeitschaltuhr werden zwei verschiedene Belüftungsintervalle für den oxidischen und anoxischen Betrieb in

Belebungszone I eingegeben. Das Modell berechnet über den Ziel-Sauerstoffgehalt der Lösung die benötigte Luftmenge pro Zeit und den dadurch erhaltenen Sauerstoff-Gehalt.

Ausgegeben werden der Energieverbrauch der Gebläse und des Rührwerks sowie die Konzentrationen aller 13 Stoffgruppen des ASM3-Modells und der Volumenstrom. Besonders interessant sind hierbei die Ablaufwerte für Ammonium und Nitrat, da es hierfür gesetzlich vorgeschriebene Grenzwerte gibt.

Es folgt Belebungszone II. Die Ausgangswerte der Zone I plus die Werte aus dem Teiler nach dem Vorklärbecken werden als Eingangswerte für Zone II übernommen. Über eine Zeitschaltuhr werden wieder die beiden Belüftungsintervalle eingegeben. Nach der Simulation werden auch hier der Energieverbrauch und die 13 Stoffgruppen des ASM3 sowie der Volumenstrom ausgegeben.

Das Abwasser wird weiter in das Nachklärbecken geleitet. Hier kann sich der Klärschlamm absetzen und wird größtenteils als Rücklaufschlamm in die Belebungszone I zurückgeführt. Ein Teilstrom von $70 \text{ m}^3/\text{d}$ wird als Überschussschlamm mit dem Primärschlamm aus der Vorklärung an die Faultürme weitergegeben.

Die Wasserströme der beiden Straßen werden zusammengeführt und alle Ablaufwerte des Modells werden ausgegeben.

Die Schlamm-Daten müssen zunächst vom ASM3-Modell zum ASM1-Modell konvertiert werden, anschließend werden diese zum ADM1-Modell (Anaerobic Digestion Model No.1 der International Water Association - IWA) mit insgesamt 33 Stoffgruppen (bezogen auf die hier verwendete Modellversion „adm1xp“ in SIMBA[®]) und Q (Durchflussmenge) konvertiert. Hiermit wird die Umsetzung des Klärschlammes im Faulturm simuliert. Der Energieverbrauch durch die Rührwerke und die Menge und Zusammensetzung des zu erwartenden Faulgases (CH_4 , CO_2 und H_2) werden berechnet. Weiterhin wurde ein Energieblock eingefügt, der die thermische Energie berechnet, die zum Aufheizen des Klärschlammes und zur Aufrechterhaltung einer konstanten Temperatur im Faulturm dient; der Anteil thermischer Energie, der durch Abstrahlung durch die Wärmedämmschicht verlorengelht, kann ebenfalls berechnet werden.

Anschließend kann noch die Umsetzung des Klärgases in einem Blockheizkraftwerk simuliert und die zu erwartende elektrische und thermische Energie berechnet werden.

Für alle Zonen der Kläranlage können die jeweiligen Daten der Simulation ausgegeben und mit den realen Daten der online-Messung verglichen werden (**Abbildung 12**).

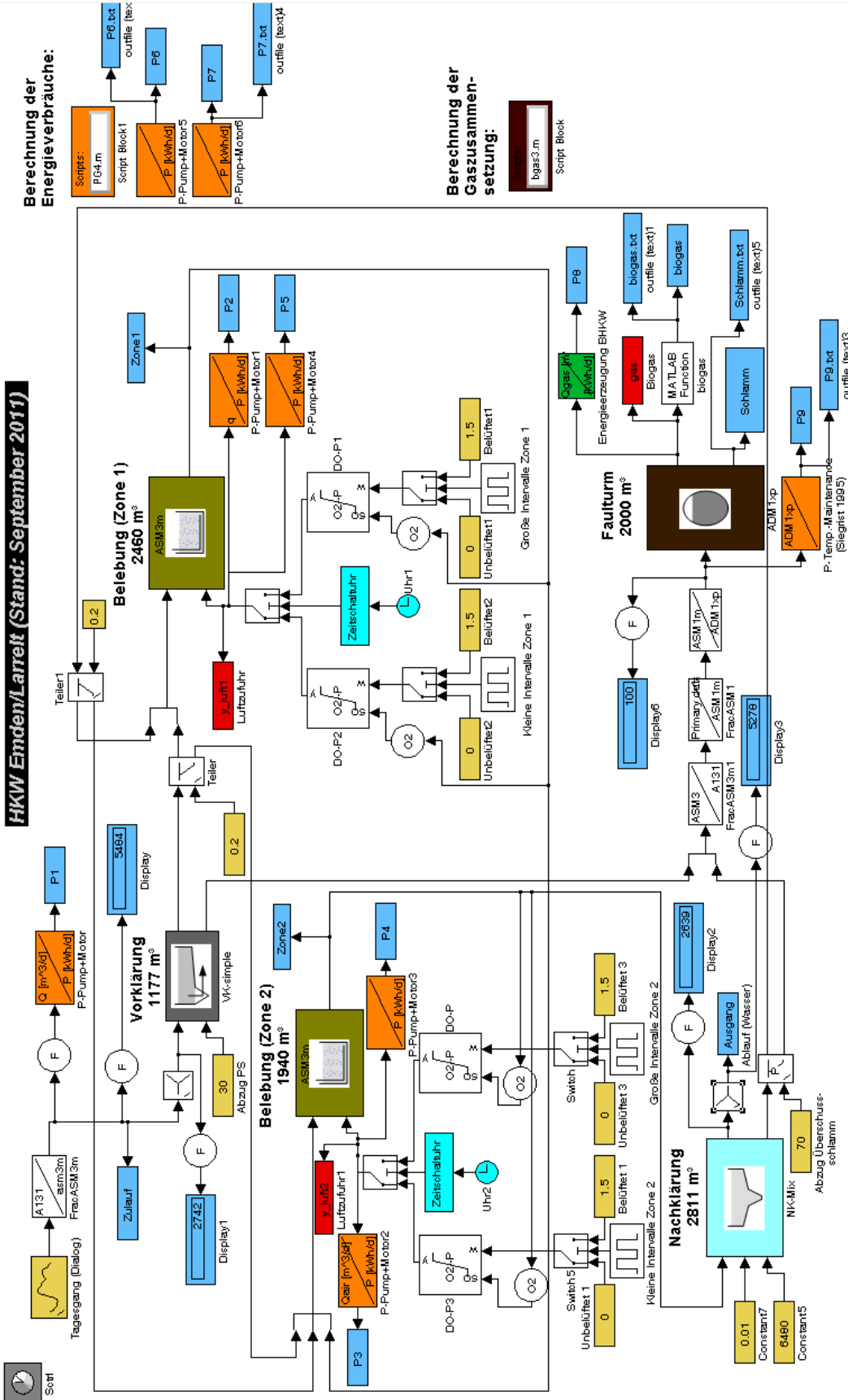


Abbildung 11: Modellierung des HKW Emden unter SIMBA 6.

Über die Zeitschaltuhr gelang es sehr gut, die simulierten Sauerstoffgehalte mit den realen in Übereinstimmung zu bringen. Auch der zeitliche Verlauf der Ammonium-Konzentration weist eine recht gute Übereinstimmung auf, besonders der Ablauf der Minima und Maxima der Kurven. Die Unterschiede zwischen den Minima und Maxima sind in der Messung allerdings wesentlich deutlicher ausgeprägt als in der Simulation und die Absolutwerte der NH_4^+ -Konzentration liegen in der Realität deutlich niedriger als in der Simulation. Die Nitrat-Werte wurden nur errechnet. Aus Kostengründen wurde in der Zone I des Belebungsbeckens I eine Redox-Elektrode eingebaut, die das Verhältnis von Ammonium- zu Nitrat-Ionen anzeigt. Der Vergleich der simulierten Nitrat-Werte mit den gemessenen Redox-Werten zeigt jedoch eine gute Übereinstimmung der jeweiligen Minima. Weiterhin ist gut zu erkennen, wann die Nitrifizierung stattfindet und wann denitrifiziert wird. Eine bessere Übereinstimmung könnte eventuell erzielt werden, wenn der Sauerstoffgehalt statt über einen P-Regler über einen einfachen Ein-/aus-Schalter simuliert würde.

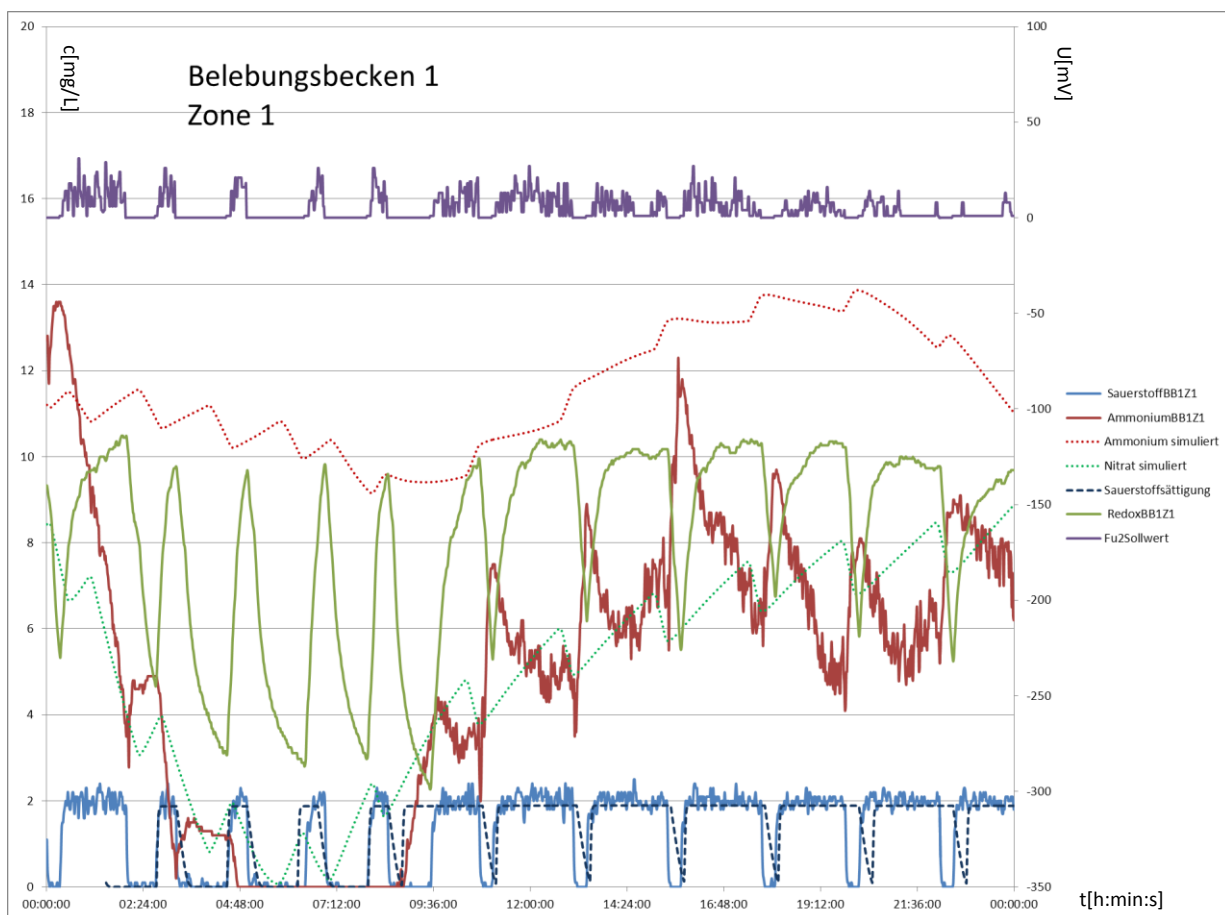


Abbildung 12: Vergleich der realen Daten (ausgezogene Linie) mit den simulierten Daten (gestrichelt)

In der Simulation der Kläranlage wird der grobe Verlauf der Energieverbrauchskurve (**Abbildung 13**) recht gut getroffen, allerdings werfen die stärkeren Peaks einige Fragen auf.

Sie treten auf, wenn eine größere Menge Abwasser einströmt und die Belüftung zum ersten Mal anspringt. Diese Peaks können Folge des Anlaufmoments sein, da Drehstrommotoren einen hohen Einschaltstrom haben können (Dauer bis zu einigen Sekunden). Hier ist darauf zu achten, ob es sich beim Motor des Gebläses um einen Asynchronmotor handelt und ob der

Frequenzumrichter evtl. in der Frequenz moduliert wird. Hier werden im Folgeprojekt noch entsprechende Anpassungen an den Energieblöcken unter SIMBA6® erfolgen. Außerdem wird Energie verbraucht, um das System der Belüftungsplatten vom eingeströmten Wasser zu befreien.

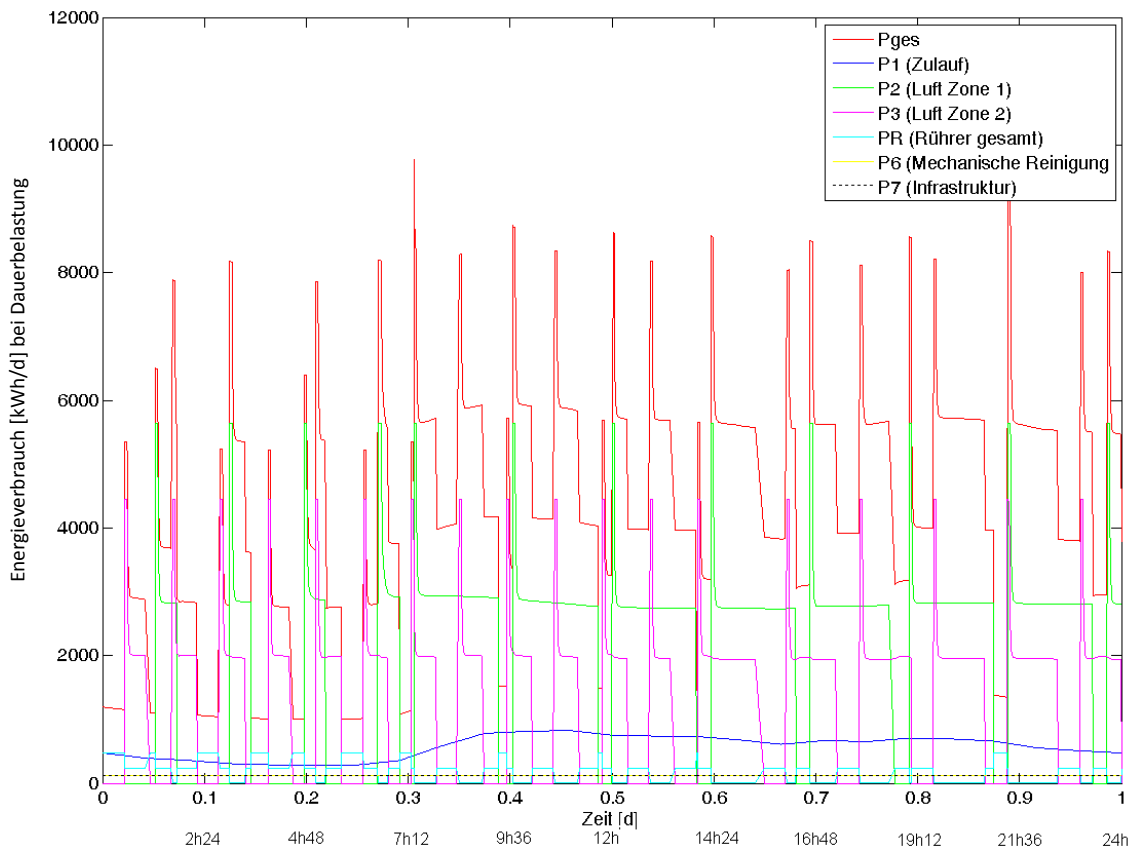


Abbildung 13: Simulierter Verbrauch der Kläranlage Emden an elektrischer Energie.

2.2.2 Ermittlung des Energiebedarfs einzelner Aggregate anhand der Leistungskennlinie

Als Basis für die Anwendung eines Energiemoduls in SIMBA sollte in jedem Fall eine Grobanalyse (siehe 2.2) durchgeführt werden. Aus dieser lassen sich einerseits bereits im Vorfeld Optimierungspotenziale ableiten. Ferner liefert sie direkt die für das Energiemodul erforderlichen Leistungskennlinien: den Zusammenhang zwischen Förderstrom und Leistungsbedarf.

Die Bestimmung der Leistungskennlinien hängt von der Art und Betriebsweise des Verbrauchers ab (vgl. **Abbildung 14**). Kleinverbraucher und ständig betriebene Aggregate (z. B. Rührwerke) können anhand der Betriebsstunden und der Nennleistung P_N bei Kenntnis des Leistungsfaktors relativ problemlos in das Energiemodul integriert werden. Unproblematisch ist auch die Implementierung von Pumpen und Verdichtern, wenn deren Leistungsaufnahme nicht durch einen Frequenzumrichter (FU) geregelt wird. Der Leistungsbedarf lässt sich dann wiederum über die Betriebsstunden, die Nennleistung und die Stromaufnahme bzw. den Leistungsfaktor ermitteln. Zu berücksichtigen sind in jedem Fall allerdings der Leistungsbedarf von Schaltschrank, Frequenzumrichter und SPS, wenn diese vorhanden sind.

Die Leistungskennlinie von Pumpen, deren Leistungsaufnahme durch einen FU bestimmt wird, kann anhand der förderstromabhängigen Verlusthöhe mit Hilfe der Pumpenkennlinien bestimmt werden. Wird die Förderhöhe nicht durch ein Manometer bestimmt, so kann eine hydraulische Berechnung der Verlusthöhe Ziel führend sein. Alternativ kann mit Hilfe eines Stromzangenamperemeters der Leistungsbedarf bei bestimmten Förderströmen gemessen werden. Da die Großverbraucher auf Kläranlagen (Pumpen und Verdichter) meist anhand eines FU geregelt werden, kommt der korrekten Bestimmung der Leistungskennlinie für diese Aggregate besondere Bedeutung zu. In **Abbildung 14** sind die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Leistungskennlinien aufgezeigt.

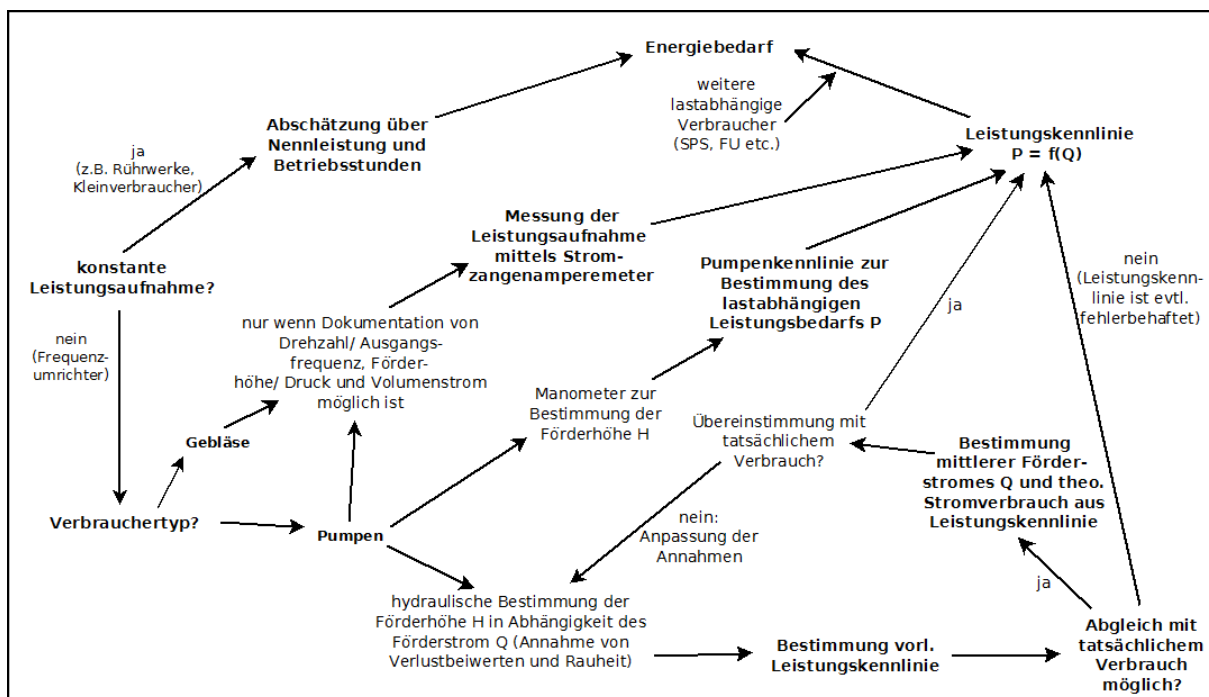


Abbildung 14: Methoden zur Bestimmung von Leistungskennlinien für die Implementierung in das ASM-ADM-Energiemodul [Wellbrock et al. 2011].

Müssen Leistungskennlinien über eine hydraulische Berechnung bestimmt werden, sollte in jedem Fall eine Verifikation durch einen Abgleich mit tatsächlichen Verbrauchsdaten erfolgen. Im Weiteren wird aufgezeigt, inwieweit ansonsten die Annahme falscher Verlustbeiwerte und Rauheiten die Leistungskennlinie beeinflussen kann.

Die Kläranlage Reinfeld verfügt nicht über ein zentrales Prozessleitsystem, welches den Energieverbrauch einzelner Verbraucher erfassen würde. Auch sind keine Stromzähler für einzelne Anlagenteile vorgesehen, welche Aufschluss über den spezifischen Energiebedarf geben könnten.

Um den Stromverbrauch der einzelnen Aggregate auf der Kläranlage Reinfeld ermitteln zu können, wurden über einen Zeitraum von drei Monaten täglich die Betriebsstunden, die Durchflusssumme sowie die Verbrauchssumme der relevanten Verbraucher erfasst, die dezentral an den Schaltschränken ausgegeben werden. Anhand der Daten kann im Anschluss geprüft werden, inwieweit die Annahme von empirischen Verlustbeiwerten bei der Bestimmung der Leis-

tungskennlinie den tatsächlichen Stromverbrauch über- oder unterschätzt. Basis einer jeden Betrachtung sollte in jedem Fall ein Kataster aller Verbraucher sein.

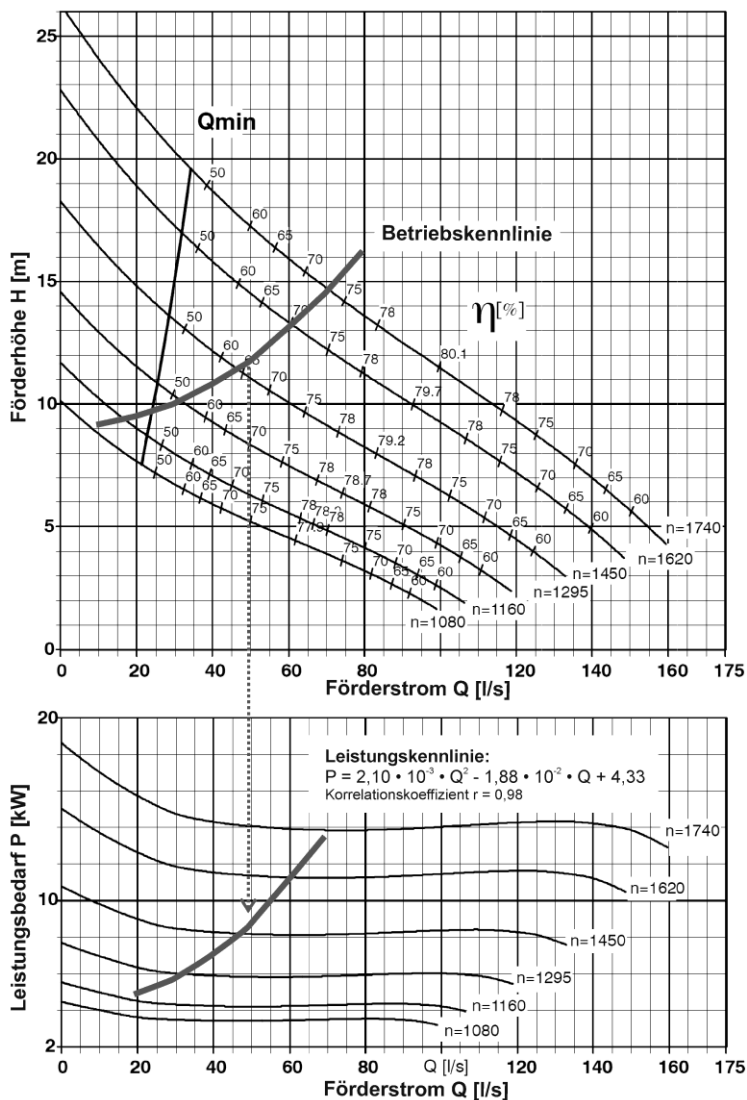


Abbildung 15: Teilgraphische Bestimmung der Leistungskennlinie anhand hydraulischer Berechnung der Förderstrom abhängigen Verlusthöhe. Hier exemplarisch für die Pumpen des Zulaufpumpwerkes; angenommene Rohrrauheit $k = 0,4$ mm [Auszug aus KSB-Katalog, Sewatech D 150-251, verändert und ergänzt].

Der tatsächliche Energiebedarf einer Pumpe hängt von deren Nennleistung P_N , der Gesamtförderhöhe H (Summe der geodätischen Förderhöhe H_{geo} und der Verlusthöhe H_V), dem Förderstrom Q sowie der durch einen Frequenzrichter (FU) modulierten Eingangsfrequenz ab. Letztere ist in Abhängigkeit der Motorwicklung proportional zu der Motordrehzahl n und hat mithin maßgeblichen Einfluss auf den Wirkungsgrad der Pumpe.

Verschiedene Methoden zur Ermittlung des Energiebedarfs wurden untersucht. Diese können zur Abschätzung und Verifizierung der ermittelten Daten beitragen.

Die hydraulische Vergleichsrechnung ist eine häufig, insbesondere für die Dimensionierung von Pumpen, angewandte Methode, um den Leistungsbedarf eines Aggregats zu bestimmen. Der Rechnung liegen hierbei stets Annahmen für lokale Verluste und Reibungsverluste zugrunde, die in der Praxis schwer zu verifizieren sind. Die Richtigkeit der Berechnungen bleibt daher stets mit einer bestimmten Ungenauigkeit behaftet.

Wie **Abbildung 14** zeigt, muss dennoch die theoretische Leistungskennlinie unter Umständen anhand einer hydraulischen Vergleichsrechnung verifiziert werden, falls berechnete und tatsächliche Werte zu weit voneinander abweichen. Grundlage hierfür kann die Ermittlung eines mittleren Förderstromes Q_m sein. Auch auf Kläranlagen ohne zentrales Prozessleitsystem sind häufig an den Schaltschränken Bedienmodule integriert, die eine manuelle Erfassung der Förderstromsumme und der Betriebsstunden ermöglichen. Hieraus kann für einen bestimmten Beobachtungszeitraum der mittlere Förderstrom ermittelt werden.

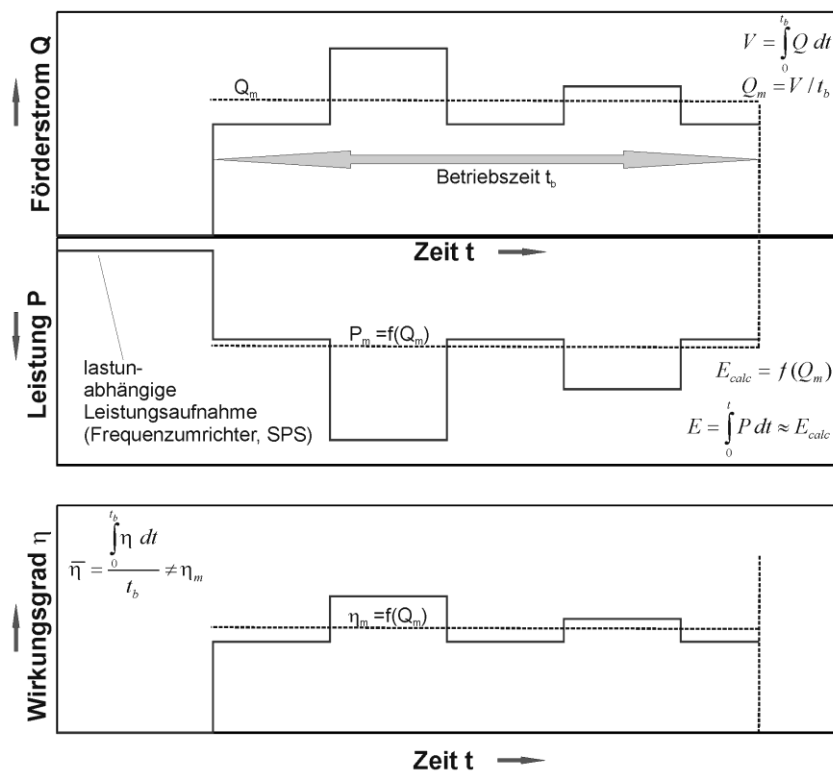


Abbildung 16: Probleme bei der Bestimmung des Wirkungsgrades - Während der Betriebszeit t_b wird ein mittlerer Förderstrom Q_m ermittelt. Der hieraus berechnete Stromverbrauch E_{calc} wird über- oder unterschätzt, da der tatsächliche Wirkungsgrad η nicht korrekt ermittelt wird.

Wenn sowohl Betriebsstunden und Förderstromsumme diskontinuierlich erfasst werden (z. B. tägliche Ablesung), ist der aus dem mittleren Förderstrom abgeleitete Stromverbrauch fehlerbehaftet. Wie **Abbildung 16** zeigt, kann der auf Basis eines mittleren Förderstroms ermittelte Wirkungsgrad vom tatsächlichen abweichen ($\eta \neq \eta_{calc}$). Je nachdem in welchem Lastbereich die Pumpe zwischen zwei Ablesungsintervallen betrieben wurde, wird der Stromverbrauch über- oder unterschätzt.

Falls die tatsächliche Förderhöhe nicht durch eine Druckmessung (Manometer) angezeigt wird, ist besonders die exakte Bestimmung der Verlusthöhe problematisch, da diese auf der Annahme empirischer Werte beruht. Anhand bekannter Rohrgeometrien (Durchmesser, Anzahl und Form von Krümmern und sonstigen Formstücken) muss die Verlusthöhe in Abhängigkeit des Förderstromes bzw. der Fließgeschwindigkeit iterativ nach den bekannten Gesetzen der Rohrhydraulik (Darcy-Weisbach-Gleichung) ermittelt werden.

Wird die Verlusthöhe H_v in Abhängigkeit des mittleren Förderstromes rechnerisch bestimmt, kann für die entsprechende Pumpe eine spezifische Leistungskennlinie bestimmt werden (exemplarisch: **Abbildung 15**)¹, die in das Energiemodul von SIMBA® implementiert werden soll. Bereits hier lässt sich eine erste Abschätzung machen, inwieweit die Pumpen bei einem günstigen Wirkungsgrad betrieben werden. Gründe für einen niedrigen Wirkungsgrad können falsch dimensionierte Pumpen oder Rohrleitungen sein.

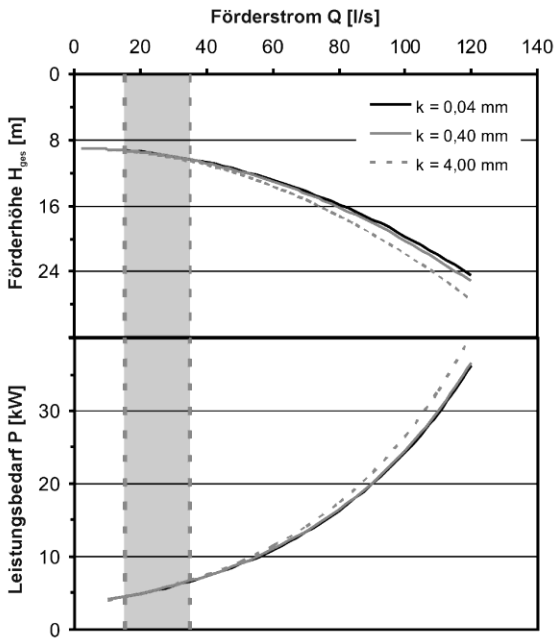
Die Rohrreibung, welche die Verlusthöhe H_v und somit die Förderhöhe H beeinflusst, hängt wesentlich von der Rauheit k des Rohres ab. Diese lässt sich in der Praxis nicht exakt ohne großen messtechnischen Aufwand bestimmen. Daher wird meist auf Referenzwerte aus der Literatur zurückgegriffen.

Wie **Abbildung 17** zeigt, kann die gewählte Rauheit k einen erheblichen Einfluss auf den Leistungsbedarf der Pumpen haben. Bei langen Druckrohren kann der Anteil der Reibung bis über 90 % der Verlusthöhe betragen. Ein falsch angenommener Wert für die Rauheit kann somit die Leistungskennlinie deutlich beeinflussen. Insbesondere wenn die geodätische Förderhöhe H_{geo} klein im Vergleich zur Verlusthöhe H_v ist, wird die Leistungskennlinie maßgeblich durch eine falsche Rauheit beeinflusst. Auch wenn die Unterschiede des Leistungsbedarfs im üblichen Lastbereich (in **Abbildung 17** grau hinterlegt) gering erscheinen, so kann sich der berechnete Gesamtstromverbrauch im Rahmen einer Bilanzierung über einen langen Zeitraum deutlich von den tatsächlichen Werten unterscheiden.

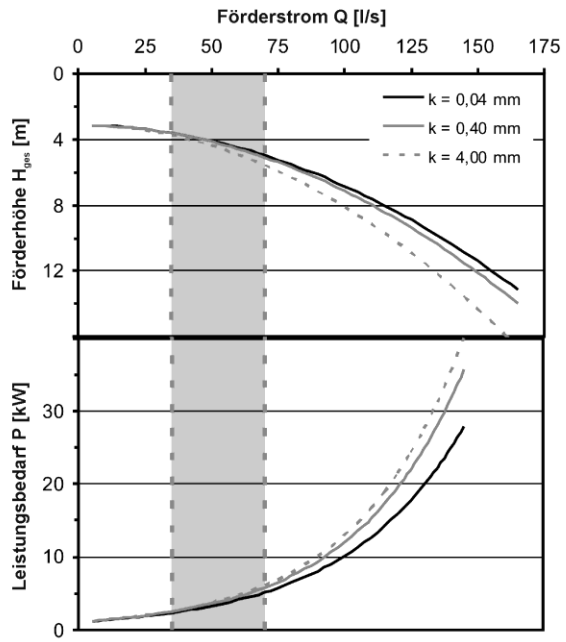
Neben den Reibungsverlusten haben örtliche Verluste (als Folge von Einbauten, Schiebern, Krümmern etc.) einen Einfluss auf die Verlusthöhe und somit die Leistungskurve. Die hierfür zu wählenden empirischen Verlustbeiwerte werden an dieser Stelle nicht behandelt.

¹ Der entsprechende Druckrohrstrang besteht aus einem 2,5 m langen Rohrstück DN150 mit einer Rückschlagklappe, einem 90°-Krümmer, zwei Schiebern und einer Erweiterung. Das anschließende Rohrstück DN200 mit einer Länge von 8,5 m weist einen 90°-Krümmer sowie einen Schieber auf. Schließlich wurde ein 14 m langes Teilstück (DN250) berücksichtigt, welches zwei 90°-Krümmer und einen 45°-Krümmer sowie je einen Verteiler und einen Schieber hat.

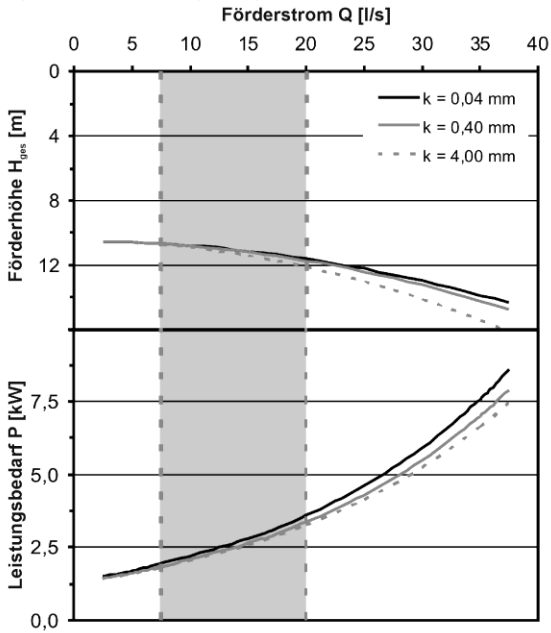
a) Zulauf



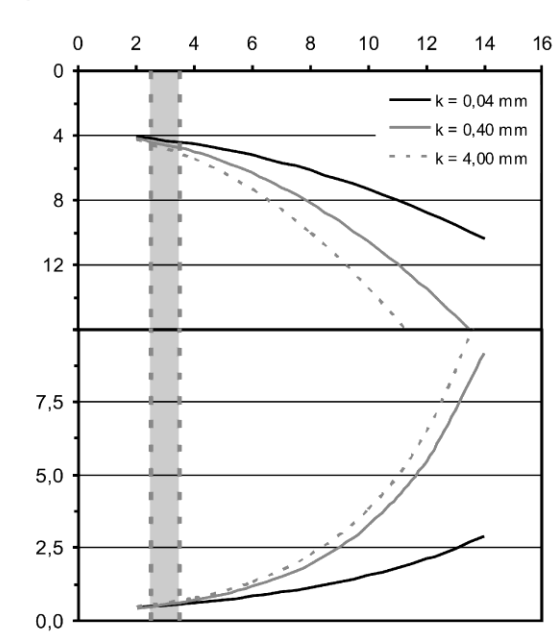
b) interne Rezirkulation



c) Rohabwasser (MAB)



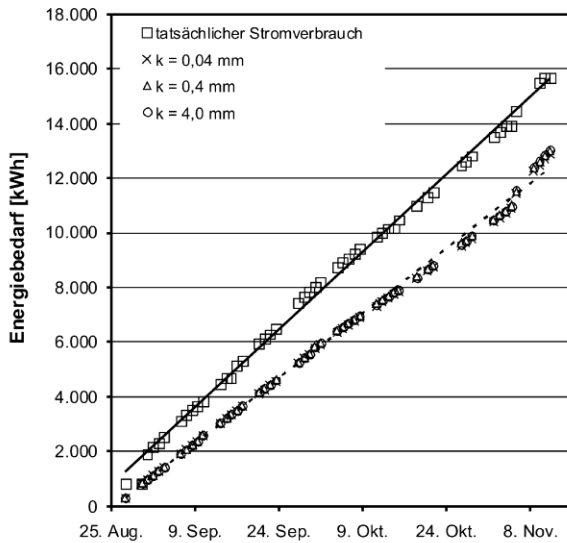
d) Überschuss-Schlamm



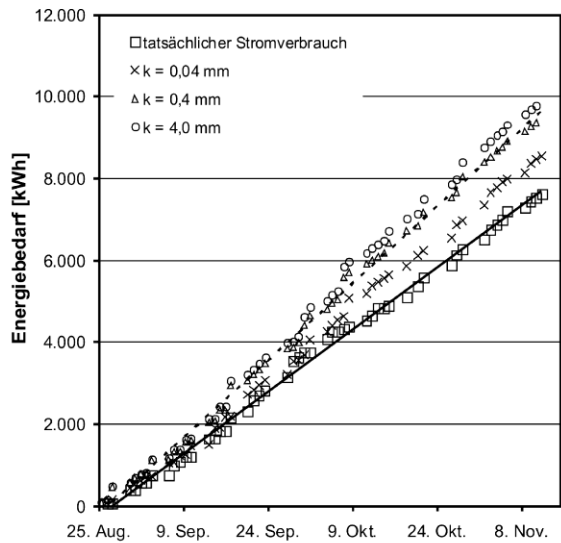
		geod. Förderhöhe H_{geo} [m]	Länge des Druckrohres [m]	Anteil der Reibung an Verlusthöhe für		
				k = 0,04 mm	k = 0,4 mm	k = 4,0 m
a) Zulauf	KSB Sewatech D 150-251	9,0	25 m	8 - 9 %	13 - 14 %	24 %
b) Rezirkulation	KSB Sewatech E 150-215	2,9	116 m	17 - 19 %	23 - 24 %	37 %
c) Rohabwasser (MAB)	KSB Sewatech E 100-250	10,5	86 m	22 - 25 %	29 - 31 %	47 %
d) Überschuss-Schlamm	KSB Sewatech F 65-250	3,9	178 m	78 - 79 %	91 %	94 %

Abbildung 17: Bestimmung der Anlagenkennlinien und der Leistungskennlinie exemplarisch für verschiedene Rohrrauheiten (grau hinterlegt ist der übliche Lastbereich).

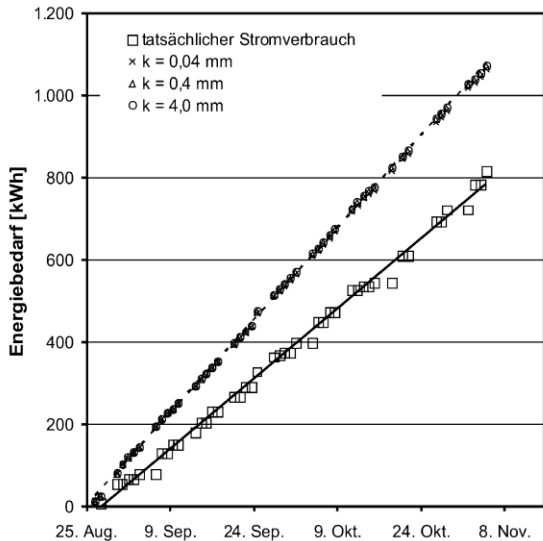
a) Zulauf



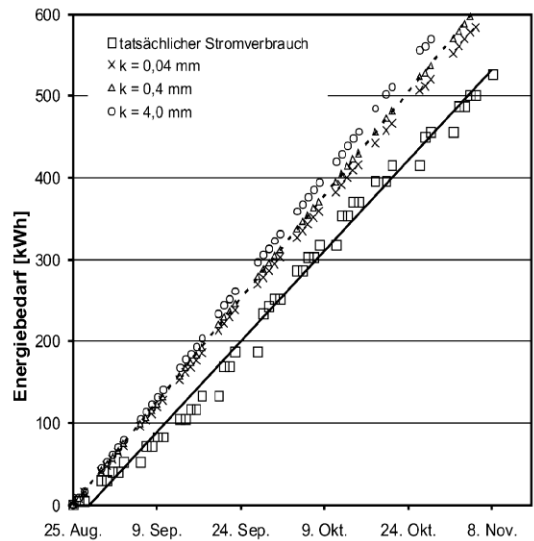
b) interne Rezirkulation



c) Rohabwasser (MAB)



d) Überschuss-Schlamm



	geod. Förderhöhe H_{geo} [m]	Länge des Druckrohres [m]	Fehler (i. M.) gegenüber tats. Stromverbrauch			
			k = 0,04 mm	k = 0,4 mm	k = 4,0 m	
a) Zulauf	KSB Sewatech D 150-251	9,0	25 m	-18 %	-17 %	-16 %
b) Rezirkulation	KSB Sewatech E 150-215	2,9	116 m	+12 %	+23 %	+28 %
c) Rohabwasser (MAB)	KSB Sewatech E 100-250	10,5	86 m	+31 %	+31 %	+32 %
d) Überschuss-Schlamm	KSB Sewatech F 65-250	3,9	178 m	+16 %	+19 %	+27 %

Abbildung 18: Stromverbrauch-Summenkurven. Angegeben sind jeweils der tatsächliche Stromverbrauch sowie der berechnete Verbrauch auf Basis eines mittleren Förderstromes einschließlich ständiger, lastunabhängiger Verbraucher.

Zur Bestimmung der endgültigen Leistungsaufnahme, sind die Wirkungsgrade von Motor und Kupplung zu berücksichtigen ($\eta_{Motor} \approx 0,90$ und $\eta_{Kupplung} \approx 0,97$). Hinzu kommen der lastunabhängige, ständige Verbrauch der SPS (etwa 70 W) und der Leistungsverlust des Frequenzumrichters (etwa 5 % der Leistungsabgabe; nur während der Betriebsstunden).

Für die exemplarisch betrachteten Druckrohrstränge wurde auf Grundlage des mittleren Förderstroms (s. o.) der Stromverbrauch anhand der hydraulischen Vergleichsrechnung ermittelt. Zugrunde gelegt wurden hierfür übliche Verlustbeiwerte und Rauheiten. **Abbildung 18** zeigt einen Vergleich mit den tatsächlichen Summenkurven des Stromverbrauches für diese Druckrohrstränge. Berücksichtigt wurden hierfür auch die lastunabhängigen, ständigen Verbraucher.

Für die untersuchte Zulaufpumpe wird demnach der Stromverbrauch im Mittel um 17 % unterschätzt (vgl. **Abbildung 18a**). Der Fehler ist kaum abhängig von der gewählten Rohrrauheit, da der Anteil der Reibungsverluste klein ist (vgl. **Abbildung 17a**). Ein deutlicher Einfluss der gewählten Rauheit lässt sich jedoch bei den Druckrohrsträngen mit verhältnismäßig kleiner geodätischer Förderhöhe feststellen (**Abbildung 18b und d**). In allen Fällen unterscheidet sich das Ergebnis der hydraulischen Berechnung deutlich vom gemessenen tatsächlichen Stromverbrauch.

Zur Bestimmung der korrekten Leistungskennlinie müssten in diesem Fall – wenn die Möglichkeit besteht – die Verlustbeiwerte und die Rauheiten solange iterativ verbessert werden, bis eine ausreichende Übereinstimmung mit den tatsächlichen Verbrauchswerten erzielt wird.

2.2.3 Messung der Leistungsaufnahme mit Hilfe von Stromzangenampere- metern

Alternativ zur Bestimmung der Leistungskennlinie anhand einer hydraulischen Berechnung kann der Leistungsbedarf mit Hilfe von Stromzangenampere-
metern gemessen werden (vgl. **Abbildung 14**). Diese Methode ist vor Allem auf Gebläse anzuwenden, da hier eine entsprechende Berechnung nicht möglich ist. Zur Bestimmung der Leistungskennlinie muss jeweils der Druck in Abhängigkeit der FU-Ausgangsfrequenz bestimmt werden. Aus letzterem lässt sich die Motordrehzahl und somit aus der Gerätekennlinie der aktuelle Luftvolumenstrom ermitteln, falls dieser nicht messtechnisch erfasst wird.

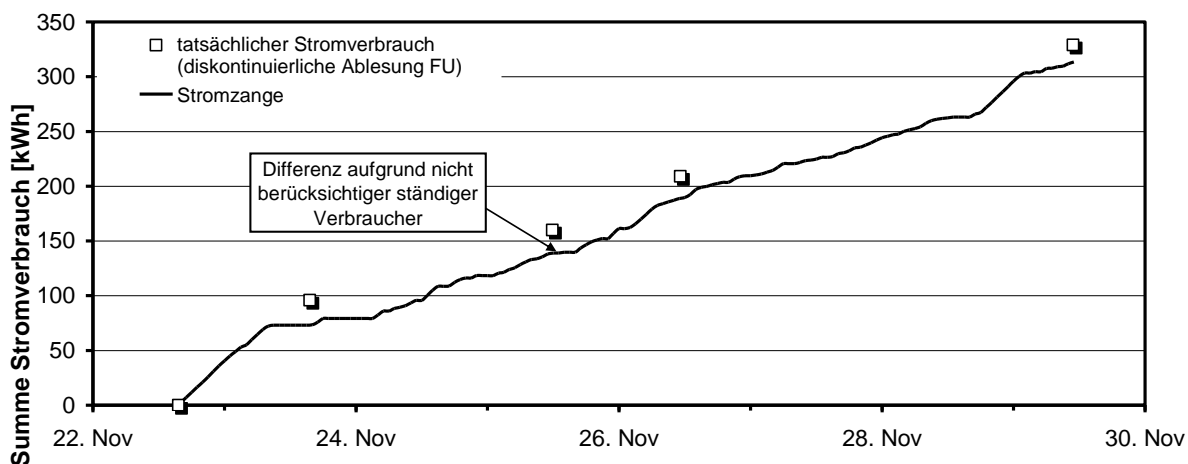


Abbildung 19: Vergleich zwischen tatsächlichem, diskontinuierlich erfasstem Stromverbrauch und mittels Stromzangenampere-
meter kontinuierlich gemessenen Werten. Zu beachten ist die Differenz, die auf der Vernachlässigung von lastunabhängigen, ständigen Verbrauchern (z. B. Frequenzumrichter) bei der Messung beruht.

Wie **Abbildung 19** exemplarisch zeigt, lassen sich die Ergebnisse der Messung mittels Stromzangenamperemeter gut zur Deckung mit den tatsächlichen Verbrauchswerten bringen. Zu beachten ist allerdings, dass die Zange meist aus praktischen Gründen am Ausgang des FU angebracht werden muss. In diesem Fall wird der ständige Verbrauch der SPS sowie der lastabhängige Verbrauch des FU nicht berücksichtigt. Hiermit ist die Verschiebung zwischen gemessenem und tatsächlichem Stromverbrauch in **Abbildung 19** zu erklären.

2.2.4 Fazit

Für die Entwicklung einer modellgestützten Prozessführung, welche eine Kläranlage auf einem energetischen Minimum steuert, ist die Definition von Leistungskennlinien unerlässlich. Verschiedene Methoden wurden betrachtet und deren Vor- und Nachteile herausgestellt. Anhand der ermittelten Leistungskennlinien lässt sich überdies feststellen, ob die Aggregate bei einem günstigen Wirkungsgrad betrieben werden. Im Vorfeld der Implementierung wird daher stets ein Optimierungspotenzial im Sinne einer Energieanalyse identifiziert.

Die korrekte Bestimmung der Förderhöhe und der daraus abgeleiteten Leistungskennlinien ist mit Schwierigkeiten behaftet. Aufgrund nicht eindeutig zu bestimmender Verlusthöhen ist der hydraulischen Ermittlung stets die Messung mittels Manometern vorzuziehen. Selbst die falsche Wahl der Rohrrauheit kann dazu führen, dass der Leistungsbedarf deutlich über- oder unterschätzt wird. Gleiches gilt für die Wahl der örtlichen Verlustbeiwerte, die hier nicht näher untersucht worden sind. Hinzu kommen möglicherweise variierende geodätische Förderhöhen, die aus unterschiedlichen Wasserständen in Vorlagebehältern resultieren können. Ein Energiemodul für ein gekoppeltes ASM-ADM-Modell, welches allein auf den empirischen Annahmen einer hydraulischen Berechnung basiert, wird stets mit Fehlern behaftet sein und somit kaum die Erreichung eines energetischen Minimums ermöglichen.

Als ideal zur Bestimmung der Leistungskennlinie ist die Messung mit Stromzangenamperemetern anzusehen. Hierfür müsste im Testbetrieb bei unterschiedlichen Ausgangsfrequenzen des Frequenzumrichters der aktuelle Leistungsbedarf, der Förderstrom und (falls variabel) die geodätische Förderhöhe bestimmt werden. Problematisch hierbei sind der verhältnismäßig hohe Aufwand sowie der Eingriff in den Betrieb der Kläranlagen.

3 Literatur

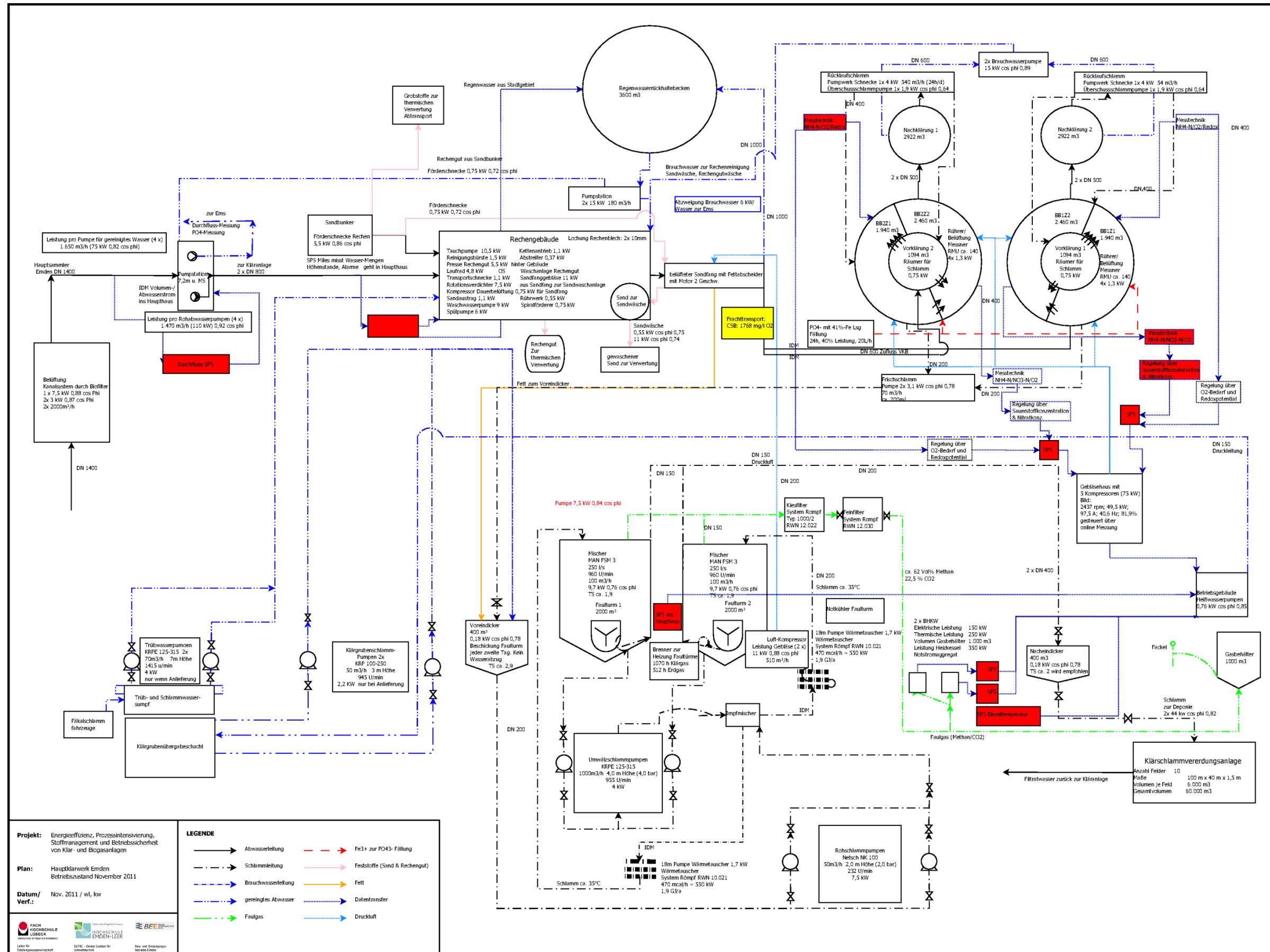
- [Alex 2010] Alex, J.: Flexibel regeln und Energie im Klärwerk sparen. Umwelt Magazin, Heft 10/11 (2010), S. 18-19.
- [Batstone 2002] Batstone, D. J.; Keller, J.; Angelidaki, I.; Kalyuzhnyi, S. V.; Pavlovstathis, S. G.; Rozzi, A., Sanders, W. T. M.; Siegrist, H.; Vavilin, V. A. (2002) Anaerobic Digestion Model No. 1, IWA Task Group on Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes, IWA Scientific and Technical Report No. 13.
- [Dohmann 2011] Dohmann, M.; Schröder, M.; Energie in der Abwasserentsorgung in KA Korrespondenz Abwasser, Abfall; 2011 (58); Nr. 6.
- [DWA 2008] 21. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen. Herausgegeben von: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), Hennef, 2008.
- [DWA 2010a] 23. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen. Herausgegeben von: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), Hennef, 2010.
- [DWA 2010b] Energiepotenziale in der deutschen Wasserwirtschaft – Schwerpunkt Abwasser. Herausgegeben von: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), Hennef, 2010.
- [Flohr 2008] Flohr, J.: Energieanalysen auf Kläranlagen – Voraussetzungen und Ansatzpunkte für eine energetische Optimierung. Beitrag zum Betreiberworkshop „Energieoptimierung und BHKWs“ am 19. Juni 2008 in Neuhausen.
- [Gujer 1995] Gujer, W.; Henze, M.; Marais, G. v. R.; Matsuo, T.; Mino, T.; Wentzel, M. C. (1995): Activated Sludge Model No.2. London: IAWQ Scientific and Technical Reports No.3.
- [Gujer 1998] Gujer, W.; Henze, M.; Mino, T.; van Loosdrecht, M. C. M. (1998): The Activated Sludge Model No.3. IAWQ Task Group on Mathematical for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment Processes. Kollekolle Seminar on Activated Sludge Modelling, Modelling and Microbiology of Activated Sludge Process, Copenhagen.
- [Haberkern 2006] Haberkern, B.; Maier, W.; Schneider, U.: Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Forschungsbericht 205 26 307 (UFA-FB 001075). Herausgegeben vom Umweltbundesamt, 2008.
- [Hölle 2004] Minimierung des Energieeinsatzes auf Kläranlagen. Beitrag zum Workshop „Neukonzeption der Abwasserverordnung“, 2004, Bonn. Online am 08.03.2010 unter http://www.goetzelmann-partner.de/deutsch/unternehmen/texte/vortrag_minimierung_energie.pdf
- [ifak 2004] Jumar, U.; Ogurek, M.; Alex, J.; Moshage, U.; Dockhorn, T.; Niemann, K.: Gesamtheitliche Prozessführung und Energieoptimierung von Abwasserreinigung und Schlammbehandlung mit Hilfe der Simulation. Abschlussbe-

richt des DBU-Projektes unter AZ 18478, Bewilligungsempfänger: Institut für Automation und Kommunikation e. V. Magdeburg, 2004.

- [Lindenthal 2011] Lindenthal, W.; Uhlenhut, F.; Borchert, A.; Steinigeweg, S.; Wellbrock, K.; Grottker, M.; Entwicklung eines Konzeptes zur Steigerung der Energieeffizienz und Betriebssicherheit sowie zur Optimierung des gekoppelten Systems Klär-/Biogasanlage, SIMBA-Anwendertreffen, Magdeburg, 2011.
- [Lübken 2005] Lübken, M.; Schlattmann, M.; Speckmaier, M.; Gronauer, A.; Wilderer, P. A.; Wichern, M. (2005a) Modelling and process optimization of an anaerobic bioreactor digesting agricultural substrates using the IWA Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). "The First International Workshop on the IWA Anaerobic Digestion Model No. 1"; 4-6 September 2005, Lyngby, Copenhagen.
- [Meinzinger 2010] Meinzinger, F.: Resource Efficiency of Urban Sanitation Systems: A comparative assessment using material and energy flow analysis. Herausgegeben durch: Gesellschaft zur Förderung und Entwicklung der Umwelttechnologien an der Technischen Universität Hamburg-Harburg e. V. In: Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 75.
- [Moshage 2003] Moshage, U.; Dockhorn, T.; Alex, J.; Ogurek, M.; Niemann, K. (2003) Gesamtheitliche Prozessführung zur Energieoptimierung von Abwasserreinigung und Schlammbehandlung durch Simulation, ATV-Bundestagung, Wolfsburg, 2003.
- [Müller 1999] Müller, E.; Kobel, B.; Künti, T.; Pinnekamp, J.; Seibert-Erling, G.; Schaab, R. and Böcker, K. (1999) Energie in Kläranlagen, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (MURL), Düsseldorf.
- [MUFV 2007] Ökoeffizienz in der Wasserwirtschaft – Steigerung der Energieeffizienz von Abwasseranlagen. Herausgeber: Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz. Mainz, 2007.
- [Niemann 2004] Niemann, K. (2004) Energieoptimierung von Abwasserreinigung und Schlammbehandlung durch Simulation, SIMBA-Anwendertreffen, Tangermünde, 2004.
- [Rojas 2010] Rojas, C.; Uhlenhut, F.; Schlaak, M.; Borchert, A.; Steinigeweg, S. (2011) Simulation des anaeroben Prozesses bei der Biogaserzeugung. Chemie Ingenieur Technik, 83 Nr. 3, S. 306 – 321.
- [Schmitt 2010] Schmitt, T. G.; Hansen, J.; Valerius, B.; Handlungsempfehlungen für eine moderne Abwasserwirtschaft, Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, Schlussbericht 14.04.2010.
- [Seibert-Erling 2011] Seibert-Erling, G.; Etges, T; Energiekosten von Kläranlagen und Kanalnetzen; in Klärwerk.info: <http://www.klaerwerk.info/Energie--und-E-Technik/Energiekosten-von-Klaeranlagen-und-Kanalnetzen> 19.05.2011

- [Schröder 2010] Schröder, M.; Energienutzung in der (Ab)Wasserwirtschaft nachhaltig gestalten, 28. Bochumer Workshop Siedlungswasserwirtschaft, Bochum, September 2010.
- [Seick 2008] Seick, I.; Tschepetzki, R.; Wertvolle Entscheidungshilfe. Simulation von Biogasanlagen, verknüpft mit Energie-, Umweltwirkungs- und Kostenberechnung; wlb Wasser, Luft und Boden, 2008.
- [Theilen 2011] Theilen U., Liebeneiner R. : Arbeitshilfe zur Verbesserung der Energieeffizienz von Abwasserbehandlungsanlagen, Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Wiesbaden, Stand 23.11.2011
- [UBA 2008] Presseinformation des Umweltbundesamtes 04/2008
- [UBA 2009] Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Herausgegeben vom Umweltbundesamt, 2009.
- [Wolf 2006] Wolf, C.: Regelungstechnische Optimierung landwirtschaftlicher Biogasanlagen anhand des ADM1-Modells in SIMBA, Vortrag auf dem 13. SIMBA-Anwendertreffen (18./19. Mai 2006).
- [Wellbrock 2011] Wellbrock, K; Schlauss, S.; Kellermeier, C.; Grottker, M; Erstellung einer Energiebilanz kleiner Kläranlagen; NTAG Lübeck, 2011.

Anlage 1: Verfahrensschema des Hauptklärwerk Emden



Anlage 2: Verfahrensschema der Kläranlage Reinfeld

