

TEXTE
82/2025

Schlussbericht

Dynamisierung von Energieanalysen zur dauerhaft energetischen Optimierung von Kläranlagen

von:

Dr.-Ing. Henry Riße, Sofia Andrés-Zapata, M.Sc., Nicklas Bielfeldt, B.Sc.

Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft an der RWTH Aachen (FiW) e. V.,
Aachen

Ashraf Abou Assaf, Dipl.-Ing. Norbert Meyer

BITControl GmbH, Nattenheim

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 82/2025

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3720 26 301 0
FB001353

Schlussbericht

Dynamisierung von Energieanalysen zur dauerhaft energetischen Optimierung von Kläranlagen

von

Dr.-Ing. Henry Riße, Sofia Andrés-Zapata, M.Sc., Nicklas
Bielfeldt, B.Sc.

Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazu-
kunft an der RWTH Aachen (FiW) e. V., Aachen

Ashraf Abou Assaf, Dipl.-Ing. Norbert Meyer
BITControl GmbH, Nattenheim

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft an der RWTH Aachen
(FiW) e. V.
Kackertstraße 15-17
52056 Aachen

Abschlussdatum:

April 2023

Redaktion:

Fachgebiet III 2.6 Abwassertechnikforschung, Abwasserentsorgung
Dr.-Ing. Nathan Obermaier

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Dynamisierung von Energieanalysen zur dauerhaft energetischen Optimierung von Kläranlagen

Die Energieanalyse nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216 nennt eine einheitliche und wirksame Methode, um energetische Schwachstellen auf Kläranlagen (KA) zu identifizieren und Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz zu ermitteln. Diese Methode ist jedoch eher statisch angelegt.

Eine Online-Überwachung des Energieverbrauches im laufenden Betrieb könnte erheblich dazu beitragen, den KA-Betrieb dauerhaft energetisch günstig zu gestalten. Insbesondere die kontinuierliche Ermittlung und Visualisierung von geeigneten, automatisch generierten Kennzahlen eröffnet neue Chancen. Gleichzeitig wäre es damit auch möglich, schnell Informationen über Unregelmäßigkeiten des täglichen Energieverbrauches und sich anbahnende negative Veränderungen im Anlagenbetrieb an einzelnen wichtigen Verfahrensschritten bzw. Aggregaten zu identifizieren.

In diesem Vorhaben wurde untersucht, inwieweit sich die vorhandenen Kennzahlen aus dem Arbeitsblatt DWA-A 216 nutzen lassen, um den energetischen Zustand einer KA kontinuierlich zu ermitteln. Zudem wurde analysiert, ob sich modifizierte Kennzahlen aus einfach zu ermittelnden Messwerten an ausgewählten wichtigen Aggregaten und Verfahrensgruppen bilden lassen. Ziel war es, aussagekräftige Kenn- und Idealwerte herauszuarbeiten und Konstellationen zu finden, die auf die Ursache von betrieblichen Schwachstellen und Verschlechterungen hindeuteten. Die Kennwertbildung orientiert sich vor allem an unkompliziert und stabil zu messenden Größen.

Abstract: Dynamization of energy analyses for the permanent energetic optimization of wastewater treatment plants

The energy analysis according to the standard DWA-A 216 provides a uniform and effective method to identify energy weak points in wastewater treatment plants (WWTP) and to determine measures to increase energy efficiency. However, this method is rather static.

The online monitoring of energy consumption during operation could make a significant contribution to a permanent energy efficient operation of a wastewater treatment plant. In particular, the continuous determination and visualization of suitable, automatically generated key figures could have a profound impact. It would be possible to quickly identify irregularities in the daily energy consumption. It could also be possible to detect deterioration in plant operation at individual process steps or aggregates.

The objective of this project was to investigate to what extent the existing key figures from the DWA-A 216 can be used to continuously determine the energy status of a WWTP. In addition, it was analyzed whether modified key figures can be formed from easily determined measured values at selected important aggregates and process groups. The aim was to identify meaningful characteristic and ideal values and to find constellations identifying the cause of operational weaknesses and deteriorations. The focus was on key figures that can be measured in an uncomplicated and stable way.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	12
Abkürzungsverzeichnis	13
Zusammenfassung	15
Summary	22
1 Einleitung	29
1.1 Hintergrund und Ziel des Projektes	29
2 Material und Methoden	30
2.1 Allgemeines Vorgehen	30
2.2 Einrichtung eines Expertenbegleitkreises	31
2.3 Literaturrecherche und Ableitung geeigneter Parameter	31
2.3.1 Ausgangspunkt: Statische Energieanalyse nach DWA-A 216	32
2.3.1.1 IST-Zustand	32
2.3.1.2 Probleme und Grenzen des DWA-A 216	34
2.3.2 Datenerfassung auf Kläranlagen – Methoden, Systeme und Visualisierungsformen	34
2.3.2.1 Erfassungsebenen zum Informationsaustausch	34
2.3.2.2 Datennutzung und Methoden	35
2.3.2.3 Möglichkeiten der Visualisierung	37
2.3.2.4 Grafische Darstellungsformen für Dashboards	39
2.3.2.5 Methode ohne zugehörige Software- ENERWATER	46
2.3.3 Gebräuchliche Softwarelösungen für Energiecheck, Energieanalyse und Visualisierung	47
2.3.3.1 ACRON der Firma DataForum Software GmbH	48
2.3.3.2 e-Gem der Firma FlowChief	48
2.3.3.3 Prozessleitsystem der Firma FlowChief	50
2.3.3.4 Energiemanagementsoftware TIBS der Firma BN Automation AG	50
2.3.3.5 Optimierungssoftware RITUNE der Firma Rittmeyer	51
2.3.3.6 Software proload.data der Firma Hydrograv	53
2.3.3.7 Software PROVI ENERGY der Firma BITControl GmbH	53
2.3.3.8 System AQASYS der Firma Schraml	54
2.3.3.9 Vergleichende Übersicht der vorgestellten Softwaresysteme für Energieanalysen und Visualisierung	54

2.3.4	Verfügbare „intelligente“ Aggregate ohne Bezug zu Energieanalysen nach DWA-A 216	56
2.3.5	Identifizierung geeigneter Parameter zur dynamischen Energieanalyse	57
2.3.5.1	Vorschläge von Parametern für verschiedene Aggregate/Verfahrensschritte sowie Betrachtungszeiträume	57
2.3.5.2	Vorschläge von neuen Kennzahlen.....	60
3	Ergebnisse und Diskussion	64
3.1	Auflistung von notwendigen und häufig fehlenden Messdaten auf Kläranlagen	64
3.2	Anforderungen an die Qualität der Messdaten zur Plausibilitätsprüfung.....	64
3.3	Überprüfung modifizierter und neuer Kennzahlen in Praxisanlagen	65
3.3.1	Kennzahl $e_{ges,tx}$	66
3.3.2	Kennzahl $e_{Bel,tx}$	67
3.3.3	Kennzahl spezifische Belüftungsleistung $e_{ver,tx}$	71
3.3.4	Kennzahl Eigenversorgungsgrad EV_{tx}	76
3.3.5	Kennzahl $e_{pw,tx}$	78
3.3.6	Abweichungskennzahl Δe_{pw}	85
3.3.7	Abweichungskennzahl Δe_{ver}	86
3.3.8	Abweichungskennzahl Δt_{TS}	88
3.3.9	Wärmekennzahlen.....	92
3.3.10	Wärmekennzahl $e_{therm,ges}$	93
3.3.11	Wärmekennzahl $e_{therm,Geb.}$	95
3.3.12	Wärmekennzahl spezifischer Wärmebedarf Faulbehälter $e_{th,FB}$	96
3.3.13	Wärmekennzahl spezifische Wärme Rohschlammerwärmung $e_{th,RS}$	97
3.3.14	Wärmekennzahl $e_{th,Notkühler}$	98
3.3.15	Wärmekennzahl $e_{th,Notkühler,Biog}$	99
3.4	Lösungen für kontinuierliche Energieoptimierung auf Aggregatebene	100
3.4.1	Kontinuierliche Energieoptimierung auf Aggregatebene – Pumpen.....	100
3.4.2	Kontinuierliche Energieoptimierung auf Aggregatebene – Fuzzy Logic Steuerung.....	101
3.4.3	Kontinuierliche Energieoptimierung auf Aggregatebene – digitaler Zwilling.....	101
3.5	Schwierigkeiten und Probleme	102
3.5.1	Sicherheitsrisiken bei Softwaresystemen	102
3.5.2	Messgenauigkeiten und Plausibilitäten	103
3.6	Aussichten zur wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Verwertung der Forschungsergebnisse.....	103
4	Fazit	105

4.1	Empfehlungen für eine dynamische Energieanalyse und technische Randbedingungen ..	105
4.1.1	Geeignete Parameter und empfohlene Kennzahlen für eine dynamisierte Energieanalyse	105
4.1.2	Empfehlungen zur Plausibilitätsprüfung von Daten	108
4.1.3	Empfehlungen für die Auswahl von Aggregaten im Zuge der Umsetzung einer dynamischen Energieanalyse.....	108
4.1.4	Hinweise für Steuerungen bei Implementierung einer dynamischen Energieanalyse... ..	108
4.1.5	Hinweise für die Darstellung, Nutzung zweier Darstellungsebenen	109
4.1.6	Vorschlag für ein Vorgehen für eine dynamisierte Energieanalyse Abfolge der Schritte zu einer dynamisierten Energieanalyse.....	112
4.1.7	Empfehlungen zum Einsatz einer dynamisierten Energieanalyse	113
4.1.8	Handlungsempfehlungen für das Arbeitsblatt DWA-A 216.....	114
4.2	Weiterer Untersuchungsbedarf	114
5	Quellenverzeichnis	115
A	Anforderungstabelle an Eingangsdaten für Kennzahlen.....	118

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Automatisierungsebenen nach Pinnekamp et al., 2017 und Roth, 2016	35
Abbildung 2:	Data-Miningprozess nach Dürrenmatt, 2012	36
Abbildung 3:	Ebenen des Vorwissens nach Hurtienne et al., 2006	38
Abbildung 4:	Jahresstromverbrauch einer Kläranlage dargestellt als Säulendiagramm mithilfe des Programmes PROVI ENERGY	40
Abbildung 5:	Stromverbrauch einer Kläranlage dargestellt als Sankey-Diagramm mithilfe der Software PROVI ENERGY.....	41
Abbildung 6:	Verschiedene Energiekennzahlen einer Kläranlage dargestellt als Liniendiagramm.....	42
Abbildung 7:	Verschiedene Energiekennzahlen einer Kläranlage dargestellt als Teppichdiagramm in der Kalenderansicht und als Farbskalensäule	43
Abbildung 8:	Verteilung der Leistung einer Kläranlage über Tag und Jahr (links) und als Liniendiagramm für ein Quartal in der Software PROVI ENERGY (rechts).....	43
Abbildung 9:	Monatsübersicht über den Betriebszustand der sechs Reinigungsstraßen der ARA Werdhölzli (links) und Darstellung einer kontinuierlichen Nitratmessung während eines ganzen Monats (rechts)	44
Abbildung 10:	Leistung einer ausgewählten Pumpe durch die Detailbetrachtung.....	45
Abbildung 11:	Irvine Ranch Water District (IRWD) Dashboard	45
Abbildung 12:	Visualisierung mit e-Gem der Firma FlowChief	49
Abbildung 13:	Energieanalyse, -auswertung und -dokumentation nach DWA mit TIBS.....	51
Abbildung 14:	Visualisierung und Optimierung mit RITUNE	52
Abbildung 15:	Grafische Darstellung der Ergebnisse mit PROVI ENERGY	53
Abbildung 16:	Dashboard AQASYS.....	54
Abbildung 17:	Abweichungsanalyse für e_{PW} (schematische idealisierte Darstellung)	61
Abbildung 18:	Kennzahl $e_{ges,tx}$ KA Asselbrunn, zeitliche Anordnung.....	66
Abbildung 19:	Kennzahl $e_{ges,tx}$ KA Asselbrunn in Abhängigkeit von der Auslastung / Zulauffracht	67
Abbildung 20:	Kennzahl $e_{Bel,tx}$ für die KA Asselbrunn.....	68
Abbildung 21:	Kennzahl $e_{Bel,tx}$ für die KA Kitzingen	69
Abbildung 22:	Spezifischer Strombedarf Belüftung in Abhängigkeit von der Zulaufbelastung KA Asselbrunn.....	70
Abbildung 23:	Spezifischer Strombedarf Belüftung in Abhängigkeit von der Zulaufbelastung KA Kitzingen	71
Abbildung 24:	Kennzahl e_{ver} KA Asselbrunn (oben BB1, unten BB2)	72

Abbildung 25:	Kennzahl e_{ver} KA Asselbrunn, Untersuchung Abhängigkeit von Q_L für BB1	74
Abbildung 26:	Kennzahl e_{ver} KA Asselbrunn, Untersuchung Abhängigkeit von Q_L für BB2	75
Abbildung 27:	Kennzahl Eigenversorgungsgrad EV_{tx} der KA Asselbrunn.....	76
Abbildung 28:	Kennzahl Eigenversorgungsgrad EV_{tx} der KA Kitzingen	77
Abbildung 29:	Stark verdichte Daten der Kennzahl $e_{PW,tx}$ KA Köln-Weiden.....	79
Abbildung 30:	Kennzahl $e_{PW,tx}$ für Zulauf-PW KA Asselbrunn.....	80
Abbildung 31:	Kennzahl $e_{PW,tx}$ für das Zwischenhebewerk der KA Asselbrunn.....	81
Abbildung 32:	Tachodarstellung für $e_{PW,tx}$ einer Abwasserpumpe im Zulauf zur KA Aachen-Eilendorf, Angabe Volumenstrom in [m ³ /h], spezif. elektrische Leistung in W/m ³ *m	82
Abbildung 33:	Nutzung Kennzahlen e_{PW} für die KA Köln-Weiden zur weiteren Pumpenoptimierung	83
Abbildung 34:	Abweichungsanalyse Δe_{PW} Rücklaufschlammk der KA Asselbrunn, Startwert: 7 Wh/m ³ *m.....	86
Abbildung 35:	Abweichungskennzahl Δe_{Ver} Gebläse 1 KA Asselbrunn	87
Abbildung 36:	Abweichungskennzahl Δe_{Ver} Gebläse 2 KA Asselbrunn	88
Abbildung 37:	Abweichungsanalyse Δt_{TS} der KA Kitzingen	89
Abbildung 38:	Abweichungskennzahl Δt_{TS} für die KA Eilendorf.....	90
Abbildung 39:	Relative Abweichung des Sauerstoffverbrauchs für die Kohlenstoffatmung in Abhängigkeit von T und t_{TS}	91
Abbildung 40:	Abschätzung Gebläseleistung für eine Kläranlage von 40.000 E, Vorklärung >1 h, sehr effiziente Belüfter (SSOTR = 18 g/(Nm ³ *m)), α -Wert = 0,8, c_x = 2 mg/l, Mittelwertbetrachtung ohne Stoßfaktoren.....	92
Abbildung 41:	Kennzahl $e_{therm,ges}$ KA Kitzingen in Abhängigkeit der Abwassertemperatur.....	94
Abbildung 42:	Gesamtwärmebedarf $e_{therm,ges}$ in Abhängigkeit vom Rohschlammvolumen und $T_{Abwasser}$	95
Abbildung 43:	Kennzahl $e_{therm,Geb}$ der KA Kitzingen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur	96
Abbildung 44:	Kennzahl $e_{th,FB}$ KA Kitzingen	97
Abbildung 45:	Kennzahl $e_{th,RS}$ der KA Kitzingen	98
Abbildung 46:	Wärmekennzahl $e_{th,Notkühler}$ KA Kitzingen.....	99
Abbildung 47:	Wärmekennzahl $e_{th,Notkühler, Biogas}$, für die KA Kitzingen	100
Abbildung 48:	Schema Fuzzy-Logic-Steuerung am Beispiel des Systems der Fa. Aqseptence	101
Abbildung 49:	Schema digitaler Zwilling	102
Abbildung 50:	Beispiel für ein Tachodiagramm der KA Eilendorf.....	110
Abbildung 51:	Mittlere Tageswerte der KA Simmerath als Beispiel für eine detaillierte Visualisierung der Energieflüsse mittels Sankey-Diagramm	111

Abbildung 52:	Beispiel für ein Tortendiagramm	111
Abbildung 53:	Beispiel für ein Teppichdiagramm.....	112
Abbildung 54:	Messtellenplanung für eine dynamische EA mit Hilfe eines Energieflussdiagramms	113

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der Arbeitspakete	30
Tabelle 2:	Kennwerte des Energiechecks des DWA-A 216.....	32
Tabelle 3:	Bewertungskriterien nach Dürrenmatt und Thürlimann, 2016	38
Tabelle 4:	Vorgehen ENERWATER Methode nach University Cranfield, 2018	47
Tabelle 5:	Vergleich der für statische und dynamische Energiebetrachtungen genutzten Softwaresysteme.....	55
Tabelle 6:	Kennzahlen nach A 216 mit modifizierten (verkürzten) Bezugszeiträumen (t_x).....	58
Tabelle 7:	Kennzahlen nach DWA-A 216 mit modifizierten Bezugsgrößen	59
Tabelle 8:	Kennzahlen zur Beschreibung Abweichungsanalyse.....	60
Tabelle 9:	Ansätze für neue Kennzahlen im Bereich Wärme	61
Tabelle 10:	Zusammenfassung notwendiger Messparameter, Zweck und Nutzen für dynamische Energieanalyse	106
Tabelle 11:	Zusammenfassung empfohlener Kennzahlen, Zweck und Nutzen für dynamische EA	107
Tabelle 12:	Anforderungstabelle an Eingangsdaten für Kennzahlen (Teil 1 von 6; Quelle: eigene Darstellung, FiW, BitControl GmbH)	118
Tabelle 13:	Anforderungstabelle an Eingangsdaten für Kennzahlen (Teil 2 von 6; Quelle: eigene Darstellung, FiW, BitControl GmbH)	119
Tabelle 14:	Anforderungstabelle an Eingangsdaten für Kennzahlen (Teil 3 von 6; Quelle: eigene Darstellung, FiW, BitControl GmbH)	120
Tabelle 15:	Anforderungstabelle an Eingangsdaten für Kennzahlen (Teil 4 von 6; Quelle: eigene Darstellung, FiW, BitControl GmbH)	121
Tabelle 16:	Anforderungstabelle an Eingangsdaten für Kennzahlen (Teil 5 von 6; Quelle: eigene Darstellung, FiW, BitControl GmbH)	122
Tabelle 17:	Anforderungstabelle an Eingangsdaten für Kennzahlen (Teil 6 von 6; Quelle: eigene Darstellung, FiW, BitControl GmbH)	123

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. , Bonn
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. , Hennef
$e_{bel,tx}$	spezifischer Strombedarf für die Belüftung über einen kürzeren Bezugszeitraum
$e_{gBel,tx}$	spezifischen Strombedarfs für die Belüftung über einen kürzeren Bezugszeitraum, *****
e_{pw}	Gesamtförderstrom des Pumpwerkes
$e_{pw,tx}$	spez. Stromverbrauch Pumpwerk als Kurzzeit oder Momentanwert, spez. Stromverbrauch Pumpwerk als Kurzzeit oder Momentanwert
$e_{th,ext,AG}$	externe thermische Wärmebezug, externer Wärmebezug bezogen auf die Gebäudefläche
$e_{th,FB}$	Wärmebedarf für die Schlammaufheizung
$e_{th,Notkühler}$	die spezifische Wärme über den Notkühler der BHKW, die spezifische Wärme über den Notkühler der BHKW
$e_{th,RS}$	spez. Wärme Schlammaufheizung
$e_{therm,Geb.}$	spez. Gesamtwärmeverbrauch Gebäude
$EV_{El,tx}$	der Eigenversorgungsgrad als Momentanwert
EV_{tx}	Eigenversorgungsgrad bzgl. Strom konnte auf verschiedene Bezugszeiträume
FiW	Forschungsinstitut für Wasser und Klimazukunft an der RWTH Aachen
FU	Frequenzumrichter
KA	Kläranlage, Kläranlage
KEK	Übergeordneter DWA Arbeitsbereich Kläranlagen, Energie, Klärschlamm
MID	Magnetisch-induktiver Durchflussmesser

Abkürzung	Erläuterung
PLS	Prozessleitsystem, Prozessleitsystem
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
t_x	Zeitpunkt x
WWTP	Waste water treatment plant
γ_{FG}	spezifische Faulgasproduktion

Toc143182962

Zusammenfassung

Die Energieanalyse (EA) nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216 gibt eine einheitliche und wirksame Methode, um energetische Schwachstellen auf Kläranlagen (KA) zu identifizieren und Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz zu ermitteln. Für die Überwachung des laufenden Betriebes einer KA ist diese Methode jedoch nicht geeignet, da die Analyse statisch ist.

Die Online-Überwachung des Energieverbrauches im laufenden Betrieb könnte erheblich dazu beitragen, den KA-Betrieb dauerhaft energetisch günstig zu gestalten. Insbesondere die kontinuierliche Ermittlung und Visualisierung von geeigneten, automatisch generierten Kennzahlen eröffnet neue Optionen. Gleichzeitig wäre es damit auch möglich, schnell Informationen über Unregelmäßigkeiten des täglichen Energieverbrauches und sich anbahrende negative Veränderungen im Anlagenbetrieb an einzelnen wichtigen Verfahrensschritten bzw. Aggregaten zu identifizieren. Die Früherkennung, die automatisierte Erfassung und Verarbeitung der Energiedaten in Verbindung mit den Prozessdaten bietet die Chance, die Energieverbrauchsminderung im Alltagsbetrieb stärker zu verankern.

Ziel des Projektes war es, konkrete praxisnahe, technisch-methodische Ansätze zu entwickeln, die eine kontinuierliche und automatisiert arbeitende energetische Analyse von Kläranlagen erlauben. Dafür wurden aussagekräftige Kennwerte und Idealwerte herausgearbeitet und an Praxisanlagen überprüft. Der Fokus war hierbei auf unkomplizierte und stabil zu messende, vorwiegend physikalische Größen gerichtet, um Kennwerte zu bilden.

Das methodische Vorgehen umfasste zunächst eine Literaturrecherche, die als Ausgangspunkt für die Ableitung geeigneter Parameter bzw. die Entwicklung von Kennzahlen diente. Die Literaturrecherche beinhaltete weiterhin die Sichtung und Prüfung kommerziell verfügbarer Softwareprodukte, die bereits Ansätze bzw. Elemente enthalten, die im Rahmen einer Dynamisierung der energetischen Betrachtung von Kläranlagen genutzt werden bzw. nutzbar sind.

Im Rahmen der folgenden Kennzahlenentwicklung wurde zunächst geprüft, welche der im Arbeitsblatt DWA-A 216 formulierten Kennzahlen sich für eine Dynamisierung bzw. die Anwendung bei deutlich verkürzten Betrachtungszeiträumen – Stunden, Tage, Wochen – eignen. Darauffolgend wurden neue Kennzahlen entwickelt, die in Anlehnung an Kennzahlen aus dem DWA-A 216 mit stark verkürzten Bezugszeiträumen nach verschiedenen Kriterien geordnet werden können, weiterhin wurden sogenannte Relativkennzahlen entwickelt, welche die Abweichung einer Kennzahl von einem definierten Startwert erkennen lassen sowie eine große Anzahl von Wärmekennzahlen.

Die Überprüfung bzw. Plausibilisierung der Kennzahlen erfolgte anhand von vier ausgewählten Kläranlagen in Asselbrunn, Kitzingen, Aachen-Eilendorf und Köln-Weiden. Zur Plausibilisierung wurden Praxisdaten herangezogen, mit denen eine Nachrechnung und Überprüfung der Kennwerte erfolgen konnte. Auf dieser Grundlage konnte eine Verifikation durchgeführt werden.

Neben den Kennzahlen wurden Lösungen für eine kontinuierliche Energieoptimierung auf Aggregatebene entwickelt bzw. identifiziert. Dabei spielten auch innovative Ansätze aus der Datenverarbeitung (Fuzzy Logic) eine Rolle. Es wurden Recherchen zu den Messgenauigkeiten und Plausibilitäten erstellt ebenso wie zu Sicherheitsrisiken bei Softwaresystemen. Da die schnelle und richtige Erfassung von Informationen in der Praxis wichtig ist, wurden verschiedene Visualisierungssysteme und Darstellungsweisen auf ihre Eignung sowie auf Vor- und Nachteile hin überprüft. Abschließend wurde eine Abfolge der Schritte für die Implementierung einer kontinuierlichen Energieanalyse definiert sowie Handlungsempfehlungen formuliert.

Die in Deutschland und im nahen Ausland gebräuchlichen Softwaresysteme unterscheiden sich in Komplexität und Leistungsfähigkeit. So gibt es „klassische“ Kläranlagendatenerfassungs- und

Archivierungsprogramme, die primär auf den Daten des Prozessleitsystems (PLS) basieren und durch umfangreiche Handeingaben ergänzt werden. Diese verfügen auch über Visualisierungsmöglichkeiten, oft jedoch über nur begrenzte Möglichkeiten einer weitergehenden Datenverarbeitung. Visualisierungen gängiger PLS-Systeme begrenzen sich hierbei zum Beispiel auf einfache Ganglinien, bestimmte Vertrauensbereiche oder Warnmeldungen (Expertenbegleitkreis, 2021). Der Betrieb ist zumeist auch an einen stationären Rechner auf der KA gebunden. Für die manuelle Dateneingabe ist eine Plausibilitätsprüfung integriert, um Fehler vermeiden zu können.

Eine zweite Entwicklungsstufe sind Systeme, die ebenfalls auf den Anlagenprimärdaten basieren und auch Handeingabewerte berücksichtigen, jedoch weitergehende Auswertungen und komplexere Darstellungen erlauben – auch für energetische Parameter. Im Bereich des Monitorings beinhalten diese Softwaresysteme oft eine Leistungsüberwachung, die außerdem Alarmierungen möglich macht. Bei der automatischen Datenerfassung stehen die Daten nahezu in Echtzeit zur Verfügung und können direkt angezeigt werden. Dazu zählen z. B. die Systeme von RITUNE, PROVI ENERGY, AQUASIS sowie e-Gem.

Daneben gibt es als dritte Entwicklungsstufe vermehrt web-basierte Lösungen, die in fast jede bestehende Dateninfrastruktur integriert werden können. Die Daten können entweder manuell (z. B. über eine App) eingegeben oder direkt aus Zählerstandinformationen, Messwerten, Klimadaten, etc. über diverse Schnittstellen erfasst werden. Für die manuelle Dateneingabe ist ebenfalls eine Plausibilitätsprüfung integriert, um Fehler zu vermeiden. Bezuglich des Monitorings und der Alarmierungen gilt Ähnliches wie für die Systeme der zweiten Stufe.

Ausgehend von den bisherigen Kennzahlen nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216 wurden diese zunächst so weiterentwickelt, dass weitaus kürzere Bezugszeiträume gewählt wurden. Dazu zählen der spezifische Gesamtenergiebedarf (e_{ges}) bezogen auf t_x , der spezifische Belüftungsenergiebedarf (e_{Bel}), bezogen auf t_x , die spezifische Faulgasproduktion bezogen auf 1 Tag (Y_{FG}), der Eigenversorgungsgrad als Momentanwert bei kontinuierlicher Erfassung bzw. für Tageswerte ($EV_{El,tx}$) sowie der spezifische Stromverbrauch der Pumpwerke (e_{PW}) als Kurzzeit- oder Momentanwert. Diese Kennzahlen werden nun als $e_{ges,tx}$, $e_{Bel,tx}$ und $e_{PW,tx}$ bezeichnet.

Es zeigte sich, dass der spezifische Gesamtstromverbrauch tagesscharf ein differenzierteres Bild für die Kennzahl $e_{ges,tx}$ ergab und eine Referenzierung zu den betrieblichen Randbedingungen ermöglichte. Am Beispiel der KA Asselbrunn lag die Schwankungsbreite überwiegend zwischen 20 und 30 kWh/(E·a), es wurden jedoch auch deutlich niedrigere und deutlich höhere Werte gemessen. Die Kennzahl des modifizierten e_{ges} wurde als sinnvoll und nützlich eingeschätzt.

Analog zu $e_{ges,tx}$ wurde auch die Kennzahl $e_{Bel,tx}$ zur Darstellung des spezifischen Strombedarfs für die Belüftung über einen kürzeren Bezugszeitraum (im Vergleich zur aus dem DWA-A 216 bekannten Kennzahl e_{Bel}) dargestellt und untersucht. Auch hier wurde der Tageswert zur Vergleichbarkeit mit der Kennzahl nach DWA-A 216 auf 365 Tage hochgerechnet. Am Beispiel der KA Kitzingen wurde deutlich, dass die Schwankungsbreite sehr groß ist. Die Bestimmung dieser Kennzahl setzte voraus, dass die Gebläse über eigene Stromzähler verfügten. Die Kennzahl $e_{gBel,tx}$ wurde ebenfalls als sinnvoll und nützlich eingeschätzt.

Der Eigenversorgungsgrad bzgl. Strom konnte auf verschiedene Bezugszeiträume (EV_{tx}) sogar als Momentanwert ausgegeben bzw. dargestellt werden, womit ein hohes Maß an Transparenz und vor allem die Zuordnung von Zeit und Kontext möglich wurde. Am Beispiel der KA Kitzingen zeigte sich der hohe Eigenversorgungsgrad durch die hohen Co-Substratanteile in der Faulung zudem auch unabhängig von der Temperatur. Der Eigenversorgungsgrad bezogen auf die Momentanleistung war dort zudem eine geeignete Größe für das Energiemanagement.

Die Kennzahl $e_{pW,tx}$ stellt einen spezifischen Kennwert dar, der auch bei sehr kurzen Betrachtungszeiträumen wertvolle Aussagen liefern kann. Dies haben Auswertungen an Pumpwerken auf der KA Asselbrunn und KA Köln-Weiden gezeigt. Hier wurde e_{pW} dem Gesamtförderstrom des Pumpwerkes [m^3/h] gegenübergestellt. Es konnte anhand von sehr vielen Messwerten sichtbar gemacht werden, welche Bandbreiten an Messwerten in der Praxis auftreten können, welche Bereiche das Optimum darstellen und in welchen Bereichen der Fördermenge besonders ungünstige Werte auftreten können. In einem Beispiel eines Pumpwerkes der KA Köln-Weiden, welches mit recht effizienten Lagerstuhlpumpen, jedoch immer noch mit Freistromrad ausgerüstet ist, konnten bei Nachverfolgung der Betriebspunkte, die weit aus dem optimalen Bereich für e_{pW} hinausragen, auch die Ursachen für diese hohen spezifischen Werte gefunden werden. Die Kennzahl e_{pW} half bei hoher Messwertdichte eine Kennfeldaufnahme zu erstellen, die wiederum geeignet war, die günstigen und ungünstigen Betriebszustände zu identifizieren und schließlich auch die Wahl besser geeigneter Aggregate zu ermöglichen. Daher ist diese Kennzahl als sehr sinnvoll und nützlich einzustufen.

Neben den Kennzahlen, die nahe an denen des DWA-A 216 sind, wurden sog. Abweichungskennzahlen entwickelt. Dazu zählen die Kennzahl Δe_{Bel} , und Δt_{rs} .

Mit der Kennzahl Δe_{Bel} wird die Abweichung der spezifischen Belüftung vom Startwert abgebildet. Beabsichtigt wurde, schleichende Veränderungen bzw. spontan eintretende Verschlechterungen der Belüftungseffizienz sichtbar zu machen. Auf der KA Asselbrunn wurde festgestellt, dass die Belüftungseffizienz einem Jahresgang folgt. Zusätzlich wirkten hier jedoch die Zulauffrachten und die Betriebseinstellungen ein, so dass in diesem Falle aus der Abweichungsanalyse kaum verwertbare Informationen entnommen werden konnten. Die Aussagefähigkeit der Kennzahl Δe_{Bel} wurde von anderen Faktoren überlagert und machte einen Frachtbezug notwendig. Diese Kennzahl war somit nur bedingt nutzbar.

Die Abweichungsanalyse Δt_{rs} beschreibt die Abweichung des tatsächlichen Schlammalters vom notwendigen Schlammalter. Diese wurde für die KA Kitzingen und KA Eilendorf untersucht. Hier zeigte sich, dass in Kitzingen im Winter mit zu geringem Schlammalter gearbeitet wurde, während im Sommer deutliche Reserven bis zu 10 d bestanden. Auf der KA Eilendorf wurde bei spielsweise ein Monat ausgewählt und auch hier zeigte sich, dass deutliche Reserven bestehen. Es wurde deutlich, dass für die Betrachtung des Δt_{rs} der Betrachtungszeitraum über mehrere Tage bzw. Schlammalter gemittelt/geglättet werden sollte, um bei aktiver Nachsteuerung die notwendigen Systemreserven nicht zu stark zu verringern. Die Abweichungsanalyse Δt_{rs} konnte als sehr nützlich eingeschätzt werden, da hier erhebliche Potenziale für ein optimiertes Schlammmanagement, geringere notwendige Luftmengen in den Belebungsbecken und ggf. höhere Energiegehalte im Überschussschlamm erschlossen werden könnten. Zugleich können darüber auch ggf. zu geringe Schlammalter identifiziert und damit Ablaufverschlechterungen (Nitrifikation) vermieden werden.

Schließlich wurden für den Bereich Wärme eine ganze Reihe neue über das Arbeitsblatt DWA-A 216 hinausgehende Kennzahlen als Diskussionsgrundlage entwickelt. Diese beschreiben u. a. die spezifischen Wärmebedarfe der wichtigsten Wärmeverbraucher wie Faulung oder Schlammerwärmung, Schlammtrocknung und Gebäude zunächst bezogen auf den Einwohner. Damit wird eine Differenzierung der Kennzahlen des Wärmebedarfes einer KA möglich. Zunächst sind diese als Kennzahlen für die Jahresmittelwertbetrachtung angelegt.

Analog zum Eigenversorgungsgrad beim Strom wird ein Eigenversorgungsgrad Wärme $EV_{Wärme}$ definiert. Dieser erhält seine Bedeutung insbesondere mit Blick auf die in zunehmendem Maße installierten Trocknungsanlagen, ist aber auch für Anlagen ohne Faulgasgewinnung und Faulgasnutzung relevant. Der Eigenversorgungsgrad Wärme wäre analog zum leistungsbezogenen

Eigenversorgungsgrad beim Strom auch für Steuerungszwecke bzw. das Energie- oder Wärmemangement geeignet.

Die Kennzahl $e_{th,ext,AG}$ ist der externe thermische Wärmebezug und bezieht hier auch den Stromeinsatz für die Wärme mit ein. Eine Momentanleistungsbetrachtung (Stundenleistung) wäre zu prüfen.

Die Kennzahl $e_{th,ext,Gebäude}$ beschreibt den externen Wärmebezug bezogen auf die Gebäudefläche. Beim Wärmebedarf kann es sinnvoll sein, eine Kennzahl bezogen auf die (beheizte) Gebäudefläche zu formulieren.

Die Kennzahl $e_{th,FB}$ kennzeichnet den Wärmebedarf für die Schlammaufheizung. Darüber können Rückschlüsse über die Effizienz der Schlammerwärmung bzw. ggf. entstandene Probleme z. B. durch Anbackungen und Verkrustungen identifiziert werden. Für diese Kennzahl wird ein zeitlich recht trüges Verhalten erwartet, die Sichtbarmachung wäre über Trends zu leisten.

Zur adäquaten Überprüfung der entwickelten Wärmekennzahlen auf Praxisanlagen bestand noch erheblicher Nachholbedarf an messtechnischer Ausrüstung, um die entwickelten Kennzahlen plausibel bestimmen zu können. Allein die Beschäftigung mit dem Thema Wärmekennzahlen führte beim Betriebspersonal auf den Kläranlagen bereits zu einer Sensibilisierung für das Thema Wärme und zu z. T. innovativen Maßnahmen zu Bedarfsminderung bzw. Optimierung der Deckung durch eigene Ressourcen bspw. auf der KA Aachen-Eilendorf. Schon die Kenntnis und die folgende Integration der verschiedenen Wärmebedarfswerte abseits der Kennzahnbildung in ein Energiemanagementsystem erlaubte dem Personal, (teil-)automatisiert auch eine Optimierung der Wärmeversorgung vorzunehmen. Hier war noch erhebliches Ausbaupotenzial vorhanden.

Die erste Wärmekennzahl $e_{therm,ges}$ repräsentiert den gesamten Wärmebedarf der KA. Für die Vergleichbarkeit mit der bisher in DWA-A 216 als Jahreswert definierten Kennzahl e_{ext} machte es Sinn, diese Kennzahl ebenfalls als Jahreswert in kWh/(E·a) umzuformen. Die $e_{therm,ges}$ zeigt die große Streubreite aber auch den Jahresgang. Die große Streubreite der Tageswerte in jeder Jahreszeit war auch ein Signal, dass hier die Messtechnik und Datenerfassung noch genauer anschaut werden muss. Beispielhaft für einen zeitlichen Bezug des Wärmebedarfes über ein Jahr wurde für den gesamten Wärmebedarf der KA Kitzingen ein Jahresmittelwert von 28,7 kWh/(E·a) errechnet. Die Kennzahl $e_{therm,ges}$ erwies sich sinnvoll als Ausgangspunkt für die Positionsbestimmung und für weitere Optimierungen im Bereich Wärme auf der KA.

Mit der Kennzahl $e_{therm,Geb}$ soll der Wärmebedarf für die beheizte Gebäudefläche ermittelt werden. Naturgemäß waren dabei große Unterschiede zu erwarten. Auch die Lufttemperatur spielte dabei eine große Rolle. Als Jahresmittel wurde für die KA Kitzingen ein Wert von 217 kWh/m² bestimmt, der mit dem Verbrauch von nicht gedämmten Altbauten bzw. Bürogebäuden vergleichbar ist. Eine andere Darstellung der Kennzahl $e_{therm,Geb}$ bezieht diesen Wert auf einen Einwohnergleichwert. Damit ist eine Relation zu $e_{therm,ges}$ möglich. Für die KA Kitzingen wurde ein Wert von 1,91 kWh/(E·a) ermittelt. Damit macht der Anteil der Wärme für die Gebäudeheizung nur etwa 6,7 % des gesamten Wärmebedarfes der KA aus.

Die Kennzahl $e_{th,FB}$ sollte genauere Informationen zum Wärmebedarf für die Schlammaufheizung inkl. der Abstrahlungsverluste geben. Hierbei wurde die Wärme zur Schlammaufheizung zunächst auf den Einwohnerwert bezogen. Für die KA Kitzingen konnte erwartungsgemäß ein deutlicher Zusammenhang zur Abwassertemperatur gezeigt werden, jedoch ist die Schwankungsbreite besonders im Sommer recht hoch. Für die KA Kitzingen wurde ein Wert von durchschnittlich 26,6 kWh/(E·a) ermittelt, was etwa 92 % des gesamten Wärmebedarfes der Kläran-

lage ausmacht. Dieser einwohnerspezifische Wert liegt in ähnlicher Größenordnung wie der gesamte elektrische Energiebedarf einer Kläranlage.

Die Kennzahl $e_{th,RS}$ gibt Informationen über die Energie bezogen auf die zu erwärmende Rohschlammmenge. Hier ergaben sich Probleme bzgl. der Plausibilität der Messwerte. Die Trägheit der Messwertaufnehmer (Wärmemengenzähler) schienen sich deutlich auf die Ergebnisse auszuwirken. Die Kennzahl $e_{th,RS}$ erscheint dennoch sinnvoll als Ausgangspunkt für die Positionsbestimmung bzgl. der Effizienz der Rohschlammerwärmung für weitere Optimierungen, insbesondere der Messwerterfassung.

Mit Blick auf das Energiemanagement ist die spezifische Wärme wichtig, die über den Notkühler der BHKW abgegeben wird (Kennzahlen $e_{th,Notkühler}$ und $e_{th,Notkühler,Biog}$). Die Kennzahl $e_{th,Notkühler}$ sollte Informationen über den Anteil der BHKW-Wärmemenge geben, der über den Notkühler abgegeben wird. Dieser ist in Prozent aber auch in kWh/(E·a) darstellbar. Es zeigt sich an der KA Kitzingen, dass bereits bei Temperaturen im Abwasser von 12° C bis zu 50 % der BHKW-Wärme nicht genutzt werden konnten, an heißen Sommertagen wurden sogar bis über 90 % nicht genutzt.

Die Kennzahl $e_{th,Notkühler,Biog}$ repräsentiert die nicht genutzten Wärmemengen bezogen auf den thermischen Energieinput aus dem Biogas. Bei Ermittlung dieser Kennzahl muss noch beachtet werden, ob die BHKW eine Abgasbypassklappe haben, die im Sommer die Abgasabwärme am Wärmetauscher vorbei direkt in den Kamin leitet.

Beide Kennzahlen $e_{th,Notkühler}$ und $e_{th,Notkühler,Biog}$ geben wertvolle Informationen über noch erschließbare Abwärme potenziale auf Kläranlagen auf, die zukünftig in eigenen Anlagen z. B. für die Klärschlamm-trocknung genutzt oder an externe Nutzer abgegeben werden können.

Für die Darstellung der vorhandenen bzw. neu entwickelten Kennzahlen wurden verschiedene Formen untersucht.

Für die Umsetzung einer dynamischen E-Analyse können nachfolgende Empfehlungen gegeben werden. Dabei erfordert die dynamische und kontinuierliche Erfassung des energetischen Zustands von Kläranlagen zusätzliche Messgrößen und Parameter. Dies betrifft zunächst physikalisch-chemische Parameter, die im Prozess bzw. an ausgewählten Aggregaten gewonnen werden müssen und weiterhin zusätzliche Messgrößen zur Erfassung der eingesetzten bzw. erzeugten thermischen Energie sowie zusätzliche Messstellen für elektrische Leistung / elektrische Arbeit.

Die Bildung von Kennzahlen bzw. die Modifizierung bestehender nach DWA-A 216 für kürzere Zeiträume unterstützen das Aufzeigen des dynamischen Verhaltens, die Identifizierung von Defiziten und die Optimierung insgesamt.

Empfehlungen für weitere Messgrößen und Parameter:

- ▶ Druckmessungen in den Druckstutzen der wichtigsten Pumpen
- ▶ Sauerstoffmessungen in jeder belüftbaren und separat steuerbaren Beckengruppe
- ▶ Volumenstrommessungen möglichst separat für jede größere Pumpe

Empfehlungen für Messgrößen thermische Energie:

- ▶ Wärmemengen zu FB und für Gebäude über Wärmemengenzähler
- ▶ Abwärme über Notkühler über Wärmemengenzähler
- ▶ Wärmebezug extern (Strom oder Brennstoffe)

Empfehlungen für elektrische Messgrößen:

- ▶ Strom-/Leistungsaufnahme aller wichtigen/größeren Verbraucher (>3...5 KW)
- ▶ Laufzeiterfassung aller wichtigen/größeren Verbraucher (Betriebsstunden)
- ▶ Strom für Wärmepumpe und/oder elektr. Heizung separat erfassen
- ▶ Leistungsmessung möglichst vor FU, wenn FU integrierte Leistungserfassung, dann vorgesetzte Verluste ggf. über Faktor erfassen

Empfehlungen für weitere energetische Kennzahlen:

- ▶ Kennzahlen (modifiziert für kürzere Zeiträume) $e_{ges,tx}$, $e_{PW,tx}$, $e_{Bel,tx}$, EV
- ▶ Abweichungskennzahlen: Δe_{PW} , Δt_{ts}
- ▶ Wärmekennzahlen: EV_{Wärme}, $e_{therm,ges}$, $e_{th,RS}$, $e_{th,Notkühler}$

Eine kontinuierliche Energieoptimierung wird auch durch geeignete Aggregate unterstützt. Auszugsweise werden folgende Hinweise dazu gegeben; z. B. verstopfungsfrei arbeitende selbst reinigende Pumpen oder z. B. Ersatz von gewichtsbelasteten Rückschlagklappen an trocken aufgestellten Pumpen durch Pneumatikschieber mit angepasster Steuerung.

Die nutzbringende Umsetzung einer dynamischen Energieanalyse bzw. eines dauerhaft energetisch günstigen Betriebes erfordert ebenfalls geeignete Maßnahmen auf der Ebene der Steuerung der Aggregate und der Gesamtanlage, die vorwiegend auf der Ebene der SPS erfolgen. Jedoch sind zunehmend auch Lösungen bzgl. intelligenter Steuerung bereits auf Aggregatebene bzw. der Ebene von Aggregatgruppen möglich.

Belastbare Empfehlungen sind:

- ▶ Flexible, anpassungsfähige Belüftungssteuerung, dabei ist eine Belüftungssteuerung nicht zwangsläufig über KI oder Fuzzy Logic notwendig
- ▶ Die SPS –Programmierung sollte ggf. selber anpassbar gestaltet sein, um den Aufwand für nachfolgende Anpassungen und Optimierungen zu minimieren.

Für die Darstellung der Messwerte und Kennzahlen erscheint es sinnvoll, verschiedene Darstellungsebenen zu nutzen. Die erste Ebene erfasst insbesondere die Messwerte auf Aggregatebene und die zweite Ebene bildet größere Zusammenhänge ab. In der ersten Ebene kommt es vor allem darauf an, kurzfristige und wichtige Messwerte schnell erfassbar zu machen und schnell eine Einordnung zu bekommen. Dafür eignen sich u. a. Tachodiagramme. Wichtige (alarmierende) Einzelwerte können sinnvoll auch in Signalfeldern sichtbar gemacht werden. Nicht sofort erschließbare Zusammenhänge können über Teppichdiagramme sichtbar gemacht werden, wenn der Kontext zu nicht augenscheinlichen anderen Größen hergestellt werden soll.

Abschließend wird ein Vorschlag zur Abfolge der Schritte hin zu einer dynamisierten EA unterbreitet. Die einzelnen Schritte erfordern eine Abstimmung mit vorangegangenen Schritten.

1. Zunächst ist eine Bestandsaufnahme der Kläranlagen hinsichtlich Energie, vorhandener Verfahrenstechnik, Messtechnik und baulicher Struktur notwendig. Hier kann vorteilhaft auf eine bestehende statische Energieanalyse nach DWA-A 216 zurückgegriffen werden.
2. Im nächsten Schritt sind die zu ermittelnden Kennzahlen festzulegen und die dafür notwendigen Messgrößen zu definieren und festzuhalten.

3. Darauf aufbauend ist das Messkonzept um die notwendigen zusätzlichen Messungen festzulegen.
4. Ergänzend zu den zusätzlichen Messstellen können auch Aggregate identifiziert werden, die im Zuge einer dynamisierten EA ausgetauscht bzw. eingebaut werden sollen.
5. Sollen Aggregatgruppen unterhalb der Ebene des KA-Leitsystems weitgehend autark optimiert werden, z. B. die Belüftungssteuerung, müssen diese ausgewählt und in das Anlagenkonzept integriert werden.
6. Für die Visualisierung und Interaktion mit der Anlagensteuerung müssen die geeigneten Software- und Hardwarelösungen identifiziert bzw. ausgewählt und installiert werden.
7. Nach den Kundenwünschen wird das Visualisierungssystem für die zu messenden Größen und Kennzahlen konfiguriert/programmiert und die notwendigen Querverbindungen (wenn gewünscht) zur Anlagensteuerung (z. B. Energiemanagement) gelegt.

Mit Blick auf zukünftige Anwendungen konnte im Vorhaben gezeigt werden, dass bei einigen Kennzahlen z. B. $e_{PW,tx}$ und Δt_{TS} ein hoher praktischer Nutzen erzielt werden kann. Die zeitnahe Sichtbarmachung z. B. von ungünstigen Pumpenstaffelungen, ungünstigen Betriebspunkten und -situationen von Pumpen macht auch ein zeitnahe Handeln und eine zeitnahe Optimierung möglich. Bei der Kennzahl Δt_{TS} sind die Effekte zwar erst nach einigen Wochen belastbar, helfen hier aber deutlich, energetische Reserven in der Belüftung zu erschließen. Die möglichen Energieeinsparungen liegen für die gewählten realistischen Aggregate im Bereich von vielen tausend kWh/a, was wiederum signifikante monetäre Einsparungen zur Folge hätte. Im Bereich der Wärmekennzahlen bewirkte bereits die Beschäftigung mit dem Thema Wärme auf einigen KA die zeitnahe Umsetzung von Optimierungen und signifikante Einsparungen insbesondere beim Einsatz fossiler Energieträger im Umfang einiger tausend l Heizöl für thermische Zwecke.

Die Implementierung von Elementen einer dynamischen Energieanalyse kann auch schrittweise erfolgen – ein „Migrieren“ in die vorhandenen Systeme ist möglich.

Insbesondere für große Kläranlagen macht es Sinn, eine Dynamisierung der Energieanalyse als verpflichtende Aufgabe zu formulieren, um die dortigen hohen Potenziale auch zeitnah und effizient heben zu können.

Dennoch – auch eine dynamisierte Energieanalyse kann nur Potenziale identifizieren und Anstoß geben für praktische Energiesparmaßnahmen sowie energierelevante Prozessoptimierungen – die konkrete, situationsangepasste Ausarbeitung dieser bleibt kreative Ingenieuraufgabe.

Ausblickend kann gesagt werden, dass insbesondere durch die rasant gestiegenen Energiepreise ein zusätzlicher Motivationsschub für die Umsetzung von Energiesparmaßnahmen auf KA erfolgt.

Summary

The energy analysis according to the standard DWA-A 216 worksheet provides a uniform and effective method for identifying energetic weak points in wastewater treatment plants (WWTP) and for determining measures to increase energy efficiency. However, this method is not suitable for monitoring the ongoing operation of a WWTP, since the analysis is static.

The online monitoring of the energy consumption during operation could make a significant contribution to making the WWTP operation permanently energetically efficient. In particular, the continuous determination and visualization of convenient and automatically generated key figures opens up new possibilities. At the same time, it allows a quick identification of irregularities in daily energy consumption and impending negative changes in plant operation at individual important process steps or units. The early detection and automated collection and processing of the energy data in connection with the process data offers the opportunity to anchor the reduction of energy consumption more firmly in everyday operations.

The aim of the project is to develop concrete, practical, technical-methodical approaches that allow a continuous and automated energetic analysis of sewage treatment plants. Meaningful characteristic values and ideal values were worked out for this. The focus here was on uncomplicated and stable variables to be measured in order to form characteristic values.

The methodological approach included initially literature research, which is served as a starting point for the derivation of suitable parameters and the development of key figures. The literature research includes also the viewing and testing of commercially available software products that already contain approaches or elements that are used or can be used in the context of a dynamization of the energetic consideration of wastewater treatment plants.

As part of the following development of key figures, it was first tested which of the key figures formulated in DWA-A 216 are suitable for dynamization or for use with significantly shortened periods of observation, e.g., hours, days or weeks. Subsequently, new key figures were developed, which can be arranged according to different criteria, following key figures from the DWA-A 216 with strongly shortened reference periods, furthermore so-called relative key figures, which show the deviation of a key figure from a defined starting value, as well as a large number of heat key figures.

The verification or plausibility check of the key figures was carried out using practical data from the Asselbrunn, Kitzingen, Aachen-Eilendorf and Cologne-Weiden and Simmerath wastewater treatment plants.

In addition to the key figures, solutions for continuous energy optimization at the aggregate level were developed or identified. Innovative approaches from data processing (fuzzy logic) also play a role here. Research was carried out on measurement accuracy and plausibility as well as on security risks in software systems. Since the fast and correct acquisition of information is important in practice, different visualization systems/presentation methods were examined for their suitability as well as for advantages and disadvantages. Finally, a sequence of steps for the implementation of a continuous energy analysis was defined and recommendations for action were formulated.

The software systems used in Germany and in neighboring countries differ in complexity and performance. There are "classic" sewage treatment plant data acquisition and archiving programs that are primarily based on the data from the process control system and are supplemented by extensive manual entries. These also have visualization options, but often only limited options for further data processing. Visualizations of common process control systems are limited, for example, to simple hydrographs, certain confidence areas or warning messages (Ex-

pert Advisory Group, 2021). The operation is mostly tied to a stationary computer on the WWTP. For manual data entry, a plausibility check is integrated to be able to avoid errors.

A second stage of development are systems that are also based on the primary system data, also take into consideration manual input values, but allow further evaluations and more complex representations - also for energetic parameters. In the area of monitoring, this software often includes performance monitoring, which also outputs forecast and makes alarms possible. With automatic data collection, the data is available almost in real time and can be displayed directly. It includes, for example, the systems from RITUNE, PROVI ENERGY, AQUASIS and e-Gem.

In addition, as a third stage of development, there are increasingly web-based solutions that can be integrated into almost any existing data infrastructure. The data can either be entered manually (e.g., via an app) or recorded directly from counter reading information, measured values, climate data, etc. via various interfaces. A plausibility check is integrated for manual data entry to avoid errors. With regard to monitoring and alarms, the same applies as for the systems of the second level. A plausibility check is integrated for manual data entry to avoid errors. With regard to monitoring and alarms, the same applies as for the systems of the second level.

Based on the previous key figures according to DWA-A 216, these were initially further developed in such a way that much shorter reference periods were selected. These include the specific total energy requirement (e_{ges}), in relation to t_x , the specific aeration energy requirement ($e_{Bel,tx}$) in relation to t_x , the specific digester gas production in relation to 1 day (Y_{DG}), the degree of self-sufficiency as a current value with continuous recording or daily values $EV_{El,tx}$, as well as the specific electricity consumption pump station as short-term or instantaneous value (e_{PW}). These ratios are now referred to as ($e_{tot,tx}$), ($e_{Bel,tx}$) and ($e_{PW,tx}$).

It was shown that the specific total electricity consumption on a daily basis resulted in a more differentiated picture for the key figure e_{tot} and made it possible to refer to the operational boundary conditions. Using the example of KA Asselbrunn, the fluctuation range is between 20 and 30 kWh/(E·a), but significantly lower and significantly higher values were also measured. The indicator of the modified e_{tot} was assessed as reasonable and useful.

Similar to e_{tot} , the key figure $e_{Vent,tx}$ is also presented and analyzed to show the specific electricity demand for ventilation over a shorter reference period. Here, too, the daily value is extrapolated to 365 d for comparability with the key figure according to DWA-A 216. The example of the WWTP Kitzingen clearly shows that the range of fluctuation is very large, which could be attributed to high loads, in particular due to flushing surges from the long, branched sewer network. This could be verified based on the time allocation and the other measured parameters. The determination of this key figure presupposes that the blowers have their own electricity meters. The key figure $e_{Bel,tx}$ was also assessed as meaningful and useful.

The level of self-sufficiency with regard to electricity could be output or displayed for different reference periods (EV_{tx}) or also for the parameter electrical power EV_p - here even as an instantaneous value - which enables a high degree of transparency and, above all, the allocation of time and context became. In the example of the wastewater treatment plant in Kitzingen, the high degree of self-sufficiency due to the high co-substrate content in the digestion process is also independent of the temperature. The degree of self-sufficiency in relation to the instantaneous power was also a suitable parameter for energy management.

The indicator e_{PW} is a specific parameter that can provide valuable information even for very short observation periods. This has been shown by evaluations of pumping stations at the Asselbrunn and Cologne-Weiden wastewater treatment plants. Here, e_{PW} was compared with the total flow rate of the pumping station [m^3/h]. Based on the large number of measured values, it was

possible to visualize the range of measured values that can occur in practice, which ranges represent the optimum and in which areas of the flow rate particularly unfavorable values occur. In the example shown here of a pumping station of the Cologne-Weiden wastewater treatment plant, which is equipped with quite efficient bearing bracket pumps, but still with a vortex impeller, the causes for these high specific values could also be found by tracking the operating points, which are far outside the optimum range for e_{pw} .

The e_{pw} indicator helped to create a map at a high density of measured values, which was again suitable for identifying the favorable and unfavorable operating conditions and ultimately also for selecting more suitable aggregates. Therefore, this key figure can be considered as very meaningful and useful.

In addition to the key figures that are close to those of the A 216, so-called deviation key figures have been developed. These include the key figures Δe_{bel} and Δt_{ts} .

The Δe_{bel} indicator is expected to reveal gradual changes or spontaneous deteriorations in aeration efficiency. At the Asselbrunn wastewater treatment plant, it was possible to visualize the significant influence of, for example, a functioning or non-functioning deammonification system on the power requirement of the aeration fans. It was found that the aeration efficiency follows an annual cycle. This was mainly due to the wastewater temperature. In addition, the influent loads and the operating settings had an effect, so that in this case hardly any usable information could be obtained from the deviation analysis. The informative value of the e_{bel} key figure was overlaid by other factors, and a freight reference was necessary. This key figure was therefore only of limited use.

The Δt_{ts} deviation analysis was examined for the Kitzingen and Eilendorf wastewater treatment plants. Here it was shown that in WWTP Kitzingen the sludge age was a little too low in winter, while there were clear reserves in summer. At the wastewater treatment plant in Eilendorf, one month was selected as an example; here, too, it was shown that there were significant reserves. It became clear that for the consideration of the Δt_{ts} the observation period should be averaged/smoothed over several days or sludge age, in order not to reduce the necessary system reserves too strongly with active follow-up control. The deviation analysis Δt_{ts} could be estimated as very useful, since here substantial potentials for an optimized sludge management, smaller necessary air quantities in the aeration basins and possibly higher energy contents in the surplus sludge could be developed. At the same time, it could also be used to identify any sludge age shortages and thus prevent deterioration of the effluent (nitrification).

Finally, a whole series of new key figures going beyond the DWA-A 216 worksheet were developed for the heat sector as a basis for discussion. The indicator numbers 10 to 13 describe the specific heat requirements of the most important heat consumers such as digestion or sludge heating, sludge drying and buildings, initially in relation to the inhabitants. This should enable a differentiation of the key figures of the heat demand of a wastewater treatment plant. Originally, these key figures are designed as key figures for the annual mean value observation.

Similar to the level of self-sufficiency in electricity code number 14 defines a degree of self-supply for heat EV_{heat} . This is particularly important in view of the increasingly installed drying plants, but is also relevant for plants without digester gas production and use. The heat self-sufficiency rate would also be suitable for control purposes or energy management or heat management, analogous to the performance-related self-sufficiency rate for electricity.

Key figure number 15 is the external thermal heat purchase $e_{th,ext,total}$ and also includes the use of electricity for heat and not just the purchase or use of fuels as before. An instantaneous performance consideration (hourly performance) would have to be checked.

With a view to energy management, the specific heat that is emitted via the combined heat and power plant's (CHP) emergency cooler (key figures 16 and 17) ($e_{th,Notkühler}$) is important. This represents an unused or often unusable potential.

The key figure 18 $e_{th,ext,AG}$ describes the external heat supply in relation to the building area. When it comes to heat demand, it can make sense to formulate a key figure based on the (heated) building area, analogous to the key figures for residential buildings and offices.

The index 19 $e_{th,FB}$ indicates the heat requirement for the sludge heating including the losses by radiation. This should enable conclusions to be drawn about the efficiency of the sludge heating and any problems that may have arisen, e.g. due to caking and encrustations. A rather sluggish behavior over time is expected for this indicator. The visualization would then be done via trends.

There was still a considerable need to catch up on measuring equipment in order to be able to plausibly determine the developed key figures in order to adequately check the heat indicators developed on practical systems as part of work package 3. Dealing with the topic of heat indicators alone has already led to a sensitization for the topic of heat in the sewage treatment plants and to partly innovative measures to reduce demand or optimize coverage through own resources, e.g. at the WWTP Aachen-Eilendorf.

Just the knowledge and the subsequent integration of the various heat requirement values apart from the formation of key figures in an energy management system allowed the staff to (partially) automatically optimize the heat supply. There was still considerable potential for expansion here.

The first heat index $e_{therm,ges}$, which represented the total heat requirement of the WWTP, was recorded at the WWTP Kitzingen as a daily value in kWh/(E·d). For comparability with the key figure e_{ext} , which was previously defined as an annual value, it made sense to convert this key figure into kWh/(E·a) as an annual value. The $e_{therm,ges}$ shows the large spread but also the annual cycle, which was particularly dependent on the wastewater temperature. The large spread of the daily values in every season was possibly also a signal that the measuring technology and data acquisition must be examined more closely. A certain averaging, e.g. over a week, may also make sense. An annual mean value of 28.7 kWh/(E·a) was calculated for the entire heat demand of the KA Kitzingen. This was the first time that this key figure was also considered over the year. The value of almost 29 kWh/(E·a) roughly corresponds to the electrical energy consumption of many medium-sized sewage treatment plants. The key figure $e_{therm,tot}$ is proved to be a useful starting point for determining the position and for further optimizations in the area of heat at the WWTP.

With the code number $e_{therm,Geb}$, the heat requirement for the heated building area should be determined. This key figure is therefore strongly based on the specific heat requirement for residential and office buildings. Naturally, large differences were to be expected. The air temperature also played a major role. A value of 217 kWh/m² was determined as the annual mean for the WWTP Kitzingen, which is comparable to non-insulated old buildings or office buildings. Another representation of the key figure $e_{therm,Geb}$ relates this value to a population equivalent. Thus a relation to $e_{therm,Geb}$ is possible. A value of 1.91 kWh/(E·a) was determined for the WWTP Kitzingen. This means that the proportion of heat for heating the building accounts for only around 6.7 % of the total heat requirement at the WWTP (Figure 39).

The key figure $e_{th,FB}$ should provide more precise information on the heat requirement for heating the sludge. Here, the heat for heating the sludge was initially related to the inhabitant. As expected, a clear connection to the wastewater temperature could be shown for the WWTP Kitzingen, but the range of fluctuation is quite high, especially in summer. For the WWTP Kitzingen a

value of i.M. 26.6 kWh/(E·a) is determined, which accounts for around 92 % of the total heat requirement of the wastewater treatment plant and is of a similar magnitude to the specific total electrical energy requirement of a sewage treatment plant.

The index $e_{th,RS}$ provides information about the energy related to the raw sludge quantity to be heated. Problems arose here with regard to the plausibility of the measured values. The sluggishness of the sensors (heat meters) seemed to have a significant effect on the results. However, the key figure $e_{th,RS}$ seemed to make sense as a starting point for determining the position regarding the efficiency of raw sludge heating, for further analyzes and optimization. Attempts should be made here to optimize the acquisition of measured values so that the results are realistic and plausible.

The key figure $e_{th,Notkühler}$ should provide information about the amount of heat that is released via the emergency cooler. This can be represented in % but also in kWh/(E·a). The key figure $e_{th,Notkühler}$ actually represented the amount of heat not used (= losses). It turns out that even at temperatures of 12° C in the waste water, up to 50 % of the CHP heat could not be used, on hot summer days this value reaches over 90%! This key figure provided valuable information about waste heat potentials that can still be exploited in sewage treatment plants, which can be used in future in our own plants, e.g. for drying sewage sludge, or passed on to external users.

Various forms were examined for the presentation of the existing or newly developed key figures.

The following recommendations can be given for the implementation of a dynamic e-analysis. The dynamic and continuous recording of the energetic status of sewage treatment plants requires additional measured variables and parameters. This initially affects physical and chemical parameters that (must) be obtained in the process or on selected units, as well as additional measured variables for recording the thermal energy used or generated and additional measuring points for electrical power/electrical work.

The formation of key figures or the modification of existing ones according to DWA-A 216 for shorter periods of time support the demonstration of dynamic behavior, the identification of deficits and the optimization as a whole.

The enumeration is supported by the following tables, which summarize the purpose and benefits of the respective measurement parameters and key figures.

Recommendations for other measured variables and parameters:

- ▶ Pressure measurements in the discharge nozzles of the main pumps
- ▶ Oxygen measurements in each pool group that can be aerated and controlled separately
- ▶ Volume flow measurements, if possible, separately for each larger pump

Recommendations for measured variables thermal energy:

- ▶ Heat quantities to sludge digester and for buildings via heat meter
- ▶ Waste heat via emergency cooler via heat meter
- ▶ External heat supply (electricity or fuel)

Recommendations for electrical measurements:

- ▶ Current/power consumption of all important/larger consumers (>3-5 KW)

- ▶ Electricity for heat pump and/or electr. record heating separately
- ▶ Power measurement in front of the frequency converter, if possible, if the frequency converter has integrated power measurement, then record the upstream losses using a factor if necessary

Recommendations for further energetic indicators:

- ▶ Key figures (modified for shorter periods) $e_{ges,tx}$, $e_{PW,tx}$, e_{Bel} , EV
- ▶ Key figures (deviation key figures): Δe_{PW} , Δt_{TS}
- ▶ Heat indicators: EV_{heat}, $e_{therm,ges}$, $e_{th,RS}$, $e_{th,Notkühler}$

Continuous energy optimization is also significantly supported by suitable aggregates. In extracts, the following recommendations are given:

1. Non-clogging, self-cleaning pumps where there is an acute or regular risk of clogging
2. Replacement of weight-loaded non-return valves on dry-installed pumps with pneumatic slide valves with adapted controls

The beneficial implementation of a dynamic energy analysis or a permanently energetically favorable operation also requires suitable measures at the level of the control of the aggregates and the entire system, which are mainly carried out at the programmable logic controller (PLC) level. However, solutions with regard to intelligent control are increasingly possible at the unit level or the level of unit groups. There is an overlap here with the recommendations in the previous chapter.

Reliable recommendations would be:

1. Flexible, adaptable blower controls as each WWTP is different. Blower control via artificial intelligence (AI) or Fuzzy Logic is not absolutely necessary.
2. The PLC programming should be designed to be adaptable (correctable) if necessary, in order to minimize the effort for subsequent adaptations and optimizations.

For the presentation of the (additional) measured values, parameters and key figures, it makes sense to use different presentation levels. One records in particular the measured values at aggregate level, the second level depicts larger relationships. On the first level, it is particularly important to make short-term/important measured values quickly comprehensible and to get a quick classification. Speedometer diagrams are suitable for this. Important (alarming) individual values can also be made visible in signal fields. Connections that are not immediately apparent can be made visible using pattern/carpet diagrams, especially if the context is to be created/searched for other variables that are not obvious.

Finally, a proposal for the sequence of steps towards a dynamic continuous energy analysis is made. The individual steps still require coordination and iteration with previous steps.

1. First of all, an inventory of the sewage treatment plants with regard to energy, existing process engineering, measuring technology and structural structure is necessary. Here, an existing static energy analysis according to DWA-A 216 can be used to advantage.
2. In the next step, the key figures are to be determined and the measurement variables required for this are to be defined and recorded.
3. Based on this, the measurement concept for the necessary additional measurements (chemical-physical and electrical variables) is to be defined. There may be restrictions here due to the local conditions, coordination with 2).

4. In addition to the additional measuring points, aggregates can also be identified that are to be replaced or installed in the course of a dynamic energy analysis (innovative pumps, aerators)
5. If groups of units below the level of the WWTP control system are to be optimized largely independently, e.g. ventilation control, this must be selected and integrated into the system concept.
6. For visualization and interaction with the plant control system, the appropriate software and hardware solutions (technical platform) must be identified or selected and installed.
7. According to the customer's requirements, the visualization system is configured/ programmed for the variables and key figures to be measured and the necessary cross-connections (if desired) to the plant control system are established.

With a view to future applications it could be shown in the project that for some key figures, e.g. $e_{PW,tx}$ and Δt_{TS} practical benefit can be achieved. The prompt visualisation of, e.g. unfavourable pump staggering, unfavourable operating points and situations of pumps also makes prompt action and prompt optimisation possible. With the Δt_{TS} indicator, the effects can only be assessed after a few weeks, but they clearly help to identify energy reserves in the ventilation system. The possible energy savings are for the selected realistic aggregates are in the range of many thousands of kWh/a, which in turn would result in significant monetary savings. In the area of heat indicators, the topic of heat at some WWTPs has already resulted in the prompt implementation of optimisations and significant savings, especially in the use of fossil fuels in the amount of several thousand litres of heating oil for thermal purposes.

The implementation of elements of a dynamic energy analysis can also take place step by step - a "migration" into the existing systems is possible.

Especially for large wastewater treatment plants, it makes sense to formulate a dynamic energy analysis as an obligatory task, in order to be able to raise the high potentials in a timely and efficient manner.

Nevertheless, even a dynamic energy analysis can only identify potentials and provide impetus for practical energy-saving measures and energy-relevant process optimisations - the concrete, situation-adapted elaboration of these remains a creative engineering task.

Looking ahead, it can be said that the rapid rise in energy prices, in particular, is providing an additional motivation for the implementation of energy-saving measures at WWTP.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Ziel des Projektes

Auf Kläranlagen wird eine energetische Optimierung angestrebt. Die aktuelle Grundlage schafft die einheitliche und wirksame – aber statische – Methode der Energieanalyse (EA), die im Arbeitsblatt DWA-A 216 beschrieben ist. Durch die Energieanalyse können energetische Schwachstellen der Kläranlage (KA) identifiziert und Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz ermittelt werden. Jedoch erfolgt diese Energieanalyse nur diskontinuierlich und betrachtet den Zeitraum eines ganzen Jahres. Eine dynamische Betrachtung mittels einer Online-Überwachung des Energieverbrauchs im laufenden Betrieb kann zu einer dauerhaft effizienten energetischen Optimierung führen.

Diese kontinuierliche Online-Überwachung kann über automatisch generierte Kennzahlen erfolgen. Aus der Betrachtung und Visualisierung solcher Kennzahlen ergeben sich neue Möglichkeiten der Früherkennung und Energieverbrauchsminderung im Alltagsbetrieb.

Durch dieses Projekt sollen konkrete praxisnahe, technisch-methodische Ansätze entwickelt werden, die die kontinuierliche Online-Überwachung ermöglichen. Die energetische Analyse der Kläranlagen sollte zudem automatisiert ablaufen. Dafür wurden Kennzahlen und Idealwerte auf Basis von unkompliziert und stabil zu messenden Größen erarbeitet.

Im Verlauf des Projektes war zunächst die Eignung der bereits existierenden Kennzahlen aus dem Arbeitsblatt DWA-A 216 für eine dynamische Energieanalyse zu überprüfen. Aus einfach zu ermittelnden Messwerten waren neue Kennzahlen vorzuschlagen bzw. zu entwickeln und Kenngrößen zur Erkennung von betrieblichen Schwachstellen bzw. negativen Trends zu identifizieren. Zudem musste das Blickfeld erweitert werden in Bezug auf Kennzahlen im Bereich Wärme. Hierbei waren für die Praxis die Voraussetzungen für die Aufstellung zuverlässiger Wärmebilanzen, geeigneter Kennwerte und praktikabler Auswertungen herauszuarbeiten.

Bereits vorhandene Lösungen zur kontinuierlichen Kennzahlenermittlung und Visualisierung waren auf ihre Eignung zu untersuchen. Für die Visualisierung der Ergebnisse der dynamischen Analyse sowie zur Umsetzung einer kontinuierlichen Energieanalyse in der Praxis waren Empfehlungen zu geben. Ebenso sollten Handlungsempfehlungen ausgearbeitet werden.

2 Material und Methoden

2.1 Allgemeines Vorgehen

Das Projekt umfasste vier Arbeitspakete (AP). In Tabelle 1 wurde die Aufgabenstellung jedes Arbeitspaketes kurz zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete

Arbeitspaket	Inhalt
AP 1	Literaturrecherche und Ableitung geeigneter Parameter
AP 2	Einrichtung Expertenbegleitkreis/Durchführung Workshops
AP 3	Überprüfung an Praxisanlagen
AP 4	Vorschlag für Entwicklung einer dynamischen Energieanalyse

(Quelle: Eigene Darstellung, FiW)

Zuerst wurde im Rahmen von AP 1 eine Literaturrecherche durchgeführt. Dabei sollte der Ausgangspunkt für die Ableitung geeigneter Parameter bzw. Entwicklung von Kennzahlen geklärt werden. Weiterhin wurden kommerziell verfügbare Softwareprodukte gesichtet und geprüft. Diese Softwareprodukte sollten bereits Ansätze bzw. Elemente enthalten, die für die Entwicklung der Kennzahlen geeignet sind.

In der Praxis werden Visualisierungssysteme für eine schnelle und richtige Erfassung von Informationen eingesetzt. Dafür wurden im Rahmen der Literaturrecherche verschiedene dieser Visualisierungssysteme/Darstellungsweisen überprüft und Vor- und Nachteile abgewogen. Ziel dabei war, geeignete Darstellungsweisen für die jeweiligen Kennzahlen und Aussagen zu identifizieren.

Nach der Literaturrecherche erfolgte die Entwicklung der Kennzahlen in AP 2. Dazu wurden die im DWA-A 216 genannten Kennzahlen des Energiechecks betrachtet und es wurde geprüft, ob diese sich für eine Dynamisierung bzw. einen deutlich kürzeren Bezugszeitraum als der in DWA-A 216 genannte Jahreszeitraum eignen. Die entwickelten Kennzahlen kann man in drei verschiedene Gruppen gliedern. Zum einen sind das die in Anlehnung an das DWA-A 216 entwickelten Kennzahlen, die einen stark verkürzten Bezugszeitraum aufweisen, zum anderen sind es Relativkennzahlen (Abweichungskennzahlen). Diese zeichnen sich durch eine Abweichung der Kennzahl von einem definierten Startwert aus. Die letzte Kategorie ist die der Wärmekennzahlen, die zu einem wesentlichen Teil aus dem DWA Arbeitskreis KA AG 7.3 eingespeist wurden.

Die entwickelten Kennzahlen wurden dann im Rahmen von AP 3 soweit wie möglich an Praxisanlagen untersucht und auf ihre Plausibilität und Aussagekraft hin geprüft. Es wurden vier Kläranlagen mittlerer Größe für diese Plausibilisierung und Prüfung der Aussagekraft/Eignung einbezogen – KA Asselbrunn, KA Kitzingen, KA Aachen-Eilendorf und in geringem Umfang Werte der KA Köln-Weiden. Diese Kläranlagen wurden ausgewählt, da dort bereits Ansätze einer dynamisierten Energieanalyse - zumeist automatisierte Kennzahlenberechnungen - installiert waren bzw. die Ermittlung von Energiekennzahlen im Projekt in Abstimmung mit dem Personal erfolgte. Das Personal der Anlagen wirkte zudem engagiert mit und brachte z. T. eigene Entwicklungen ins Projekt mit ein, bspw. das Betriebspersonal der KA Aachen-Eilendorf.

Zusätzlich zu den Kennzahlen wurden Lösungen entwickelt bzw. identifiziert, um eine kontinuierliche Energieoptimierung auf Aggregatebene durchzuführen. Dabei wurden innovative Ansätze aus der Datenverarbeitung (Fuzzy Logic) genutzt unabhängig von den bekannten Kennzahlen nach DWA-A 216.

Es wurden Überlegungen zu den notwendigen Messgenauigkeiten und Plausibilitäten erstellt und Vorschläge für weitere zu erhebendem Parameter und Messgrößen erarbeitet. Ebenso wurden Überlegungen zu Sicherheitsrisiken bei Softwaresystemen angestellt.

Zuletzt wurden in AP 4 Handlungsempfehlungen formuliert und eine Abfolge an Schritten für die Implementierung einer kontinuierlichen Energieanalyse bzw. eines kontinuierlichen Energiechecks festgelegt.

2.2 Einrichtung eines Expertenbegleitkreises

Zur Reflektierung der Ergebnisse und Einbeziehung eines weiteren Fachverständes wurde ein Expertenbegleitkreis im Rahmen des AP 2 eingerichtet, dem Experten mit langjährigen Erfahrungen im Bereich Energieoptimierung und Automatisierung aus Ingenieurbüros, Betreibern von Kläranlagen, der DWA und dem Umweltbundesamt angehörten.

Im Rahmen des Treffens der DWA Arbeitsgruppe KEK 7.3 erfolgte ebenfalls ein Austausch mit Mitgliedern des Expertenkreises.

In der Diskussion bezüglich der Datenerfassung auf Kläranlagen bestand Konsens, dass die **Qualität der Messdaten** einen hohen Einfluss auf das Ergebnis von Energieanalysen hat. Daher sind die folgenden Aspekte wichtig und wurden bei der Projektbearbeitung berücksichtigt:

- ▶ Definition, welche Daten notwendig sind, um **gesicherte Aussagen** treffen zu können
- ▶ Qualitätssicherung der Messung/Messsysteme: Definition, wie häufig eine Messung/Messsystem überwacht/kalibriert werden muss, um sicher gehen zu können, dass die gemessenen Daten korrekt sind

2.3 Literaturrecherche und Ableitung geeigneter Parameter

Im Rahmen des ersten APs wurde eine Recherche zu bisher bestehenden Systemen durchgeführt. Hieraus ließ sich ableiten, dass es derzeit vereinzelt Systeme gibt, die sowohl eine Software zur Energieanalyse bzw. zur Bildung der Kennwerte des Energiechecks als auch die Möglichkeit der Visualisierung beinhalten. Diese Systeme sind jedoch meist statisch und erlauben nicht die kontinuierliche und dynamische Analyse der Messwerte.

Zudem wurden in diesem AP auch Informationen zu bereits eingesetzten Softwaresystemen zusammengetragen, die zur Nachberechnung der statischen Energieanalyse bzw. des Energiechecks der Energieanalyse und/oder der Visualisierung der Ergebnisse verwendet werden. Zudem wurden Visualisierungssysteme im Hinblick auf ihre Aussagekraft überprüft. Es erfolgte ebenfalls eine Betrachtung und Überprüfung der Eignung von Lösungen zur kontinuierlichen Kennzahlenermittlung und Visualisierung in AP 3.

Im AP 1 wurde eine detaillierte Recherche der bisher verfolgten Ansätze für eine automatisierte bzw. kontinuierliche energetische Untersuchung der Kläranlage durchgeführt. Dabei sollten Informationen zu Softwaresystemen zur Berechnung von Kennzahlen sowie zur Visualisierung aufgezeigt werden.

Im Folgenden werden zunächst der Stand von Energieanalysen nach dem DWA-A 216 sowie deren Probleme und Grenzen definiert. Anschließend wird auf Methoden der Datenerfassung

und -visualisierung eingegangen. Bestehende Software- und Visualisierungssysteme werden nachfolgend vorgestellt, die wiederum die Methoden der Datenerfassung und -visualisierung im Detail unterschiedlich nutzen oder umsetzen. Die verschiedenen Systeme werden am Ende des Kapitels 2.3.3 anhand ihrer wesentlichen Merkmale in der Tabelle 5 zusammengefasst.

2.3.1 Ausgangspunkt: Statische Energieanalyse nach DWA-A 216

2.3.1.1 IST-Zustand

Die Methode nach dem DWA-A 216 beinhaltet ein zweistufiges Vorgehen, bestehend aus einem Energiecheck und nachfolgend einer vertieften Energieanalyse, im Rahmen derer schließlich die Maßnahmenentwicklung erfolgt.

Die Durchführung eines Energiechecks nach DWA-A 216 ermöglicht eine erste Positionsbestimmung der Kläranlage im nationalen Vergleich hinsichtlich Energieverbrauch und Energieeinversorgung. Die Einordnung erfolgt anhand von Häufigkeitsverteilungen für ausgewählte Kennzahlen. Der Energiecheck kann auch der jährlichen Selbsteinschätzung für Kläranlagenbetreiber dienen. Er ist für die fortlaufende Erfolgskontrolle von bereits umgesetzten Maßnahmen jedoch nur bedingt nutzbar, da die Kennzahlen entweder die gesamte Anlage (e_{ges}) oder umfangreiche Verfahrensstufen abbilden (z. B. Verfahrensstufen, die an die Faulgasproduktion gekoppelt sind).

Das Vorgehen nach DWA-A 216 sieht eine Berechnung von anlagenspezifischen Idealwerten im Schritt der Energieanalyse vor. Diese sind, ebenso wie die Energiekennzahlen des Energiechecks, als statische Werte angelegt. In Tabelle 2 sind die Kennzahlen des Energiechecks des DWA-A 216 dargestellt.

Tabelle 2: Kennwerte des Energiechecks des DWA-A 216

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung	Formel	Erläuterung
e_{ges}	[kWh/(E·a)]	Spezifischer Gesamtstromverbrauch der Anlage	$e_{ges} = E_{ges}/EW_{CSB}$	E_{ges} : Stromverbrauch gesamte Anlage in kWh/a EW_{CSB} : Einwohnerwert bezogen auf 120 g CSB/(EW·d) (EZ+EGW)
e_{Bel}	[kWh/(E·a)]	Spezifischer Stromverbrauch der Belüftung*)	$e_{Bel} = E_{Bel}/EW_{CSB}$	E_{Bel} : Stromverbrauch Belüftung Belebungsbecken in kWh/a EW_{CSB} : Einwohnerwert bezogen auf 120 g CSB/(EW·d) (EZ+EGW)
e_{FG}	[I _N /(E·d)]	Spezifische Faulgasproduktion bezogen auf den Einwohnerwert	$e_{FG} = Q_{FG,d,aM}/EW_{CSB}$	$Q_{FG,d,aM}$: Jahresmittelwert Faulgasproduktion bei Normbedingungen in I _N /d (normiert auf 0 °C und 1013 mbar) EW_{CSB} : Einwohnerwert bezogen auf 120 g CSB/(EW·d) (EZ+EGW)
γ_{FG}	[I _N /kg oTR]	Spezifische Faulgasproduktion bezogen auf organische Trockenmasse	$\gamma_{FG} = Q_{FG,d,aM}/B_{d,oTM,aM}$	$Q_{FG,d,aM}$: Jahresmittelwert Faulgasproduktion bei Normbedingungen in I _N /d (normiert auf 0 °C und 1013 mbar) $B_{d,oTM,aM}$: Jahresmittelwert der

Formel-zeichen	Einheit	Bezeichnung	Formel	Erläuterung
				dem Faulbehälter zugeführten organischen Trockenmasse in kg oTR_{Schi}/d
N_{FG}	[%]	Grad der Faulgas-umwandlung in Elektrizität	$N_{FG} = E_{KWK,el} \cdot 100 / (Q_{FG,a} \cdot g_{CH4} \cdot 10)$	E_{KWK} : Jahresproduktion Strom aus Faulgasumwandlung in KWK-Anlagen bzw. Direktantrieb von Aggregaten in kWh/a Q_{FG} : Jahressumme des Faulgas-anfalls bei Normbedingungen in m ³ /a g_{CH4} : Volumenanteil des Methans am Biogasvolumen (z.B. 0,64)
EV_{EI}	[%]	Eigenversorgungsgrad Elektrizität	$EV_{EI} = (E_{KWK}/E_{ges}) \cdot 100$	E_{KWK} : Jahresproduktion Strom aus Faulgasumwandlung in KWK-Anlagen bzw. Direktantrieb von Aggregaten in kWh/a E_{ges} : Strombedarf gesamt in kWh/a
e_{ext}	[kWh _{th} /(E·a)]	Spezifischer externer Wärmebezug	$e_{th,ext} = E_{th,ext}/EW_{CSB}$	$E_{th,ext}$: extern zugeführte Energie zur Wärmeversorgung in kWh/a (fossile Brennstoffe) EW_{CSB} : Einwohnerwert bezogen auf 120 g CSB/(EW·d) ($EZ+EGW$)
e_{PW}	[Wh/(m ³ ·m)]	Spezifischer Stromverbrauch Pumpwerk	$e_{PW} = E_{PW} \cdot 1000 / (Q_{PW} \cdot h_{man})$	E_{PW} : Stromverbrauch des Pumpwerks in kWh/a Q_{PW} : Fördermenge in m ³ /a h_{man} : manometrische Förderhöhe in m

*) Falls notwendige Messwerte vorhanden sind.

(Quelle: DWA, 2015)

Die anlagenspezifischen Idealwerte bilden ein theoretisch erreichbares Niveau ab, welches mit dem aktuellen Stand der Technik erreichbar sein sollte. Diese entsprechen theoretischen Werten, die praktisch erreicht werden können. Im Einzelfall ist auch eine Unterschreitung möglich. Die Überschreitung von Idealwerten kann ein Indiz für die Notwendigkeit zur Umsetzung von Maßnahmen zur Energieoptimierung sein.

Die Summation der anlagenspezifischen Idealwerte des Stromverbrauchs der einzelnen Verfahrensstufen dividiert durch die maßgebenden EW_{CSB} bildet schließlich den Gesamtwert für den anlagenspezifischen Idealwert ab.

2.3.1.2 Probleme und Grenzen des DWA-A 216

Anlagespezifische Idealwerte sind theoretische Werte, welche unter Berücksichtigung der Vorgaben im Anhang des DWA-A 216 berechnet werden. Es sind keine absoluten Aussagen über die Erreichbarkeit der anlagespezifischen Idealwerte möglich, denn diese sind von den möglichen und gewählten technischen Lösungen zur Energieeinsparung abhängig.

Die anlagespezifischen Idealwerte nach dem DWA-A 216 werden als statische Werte berechnet und sind als Mittelwerte für ein Jahr zu verstehen. In der Praxis muss ein Aggregat oder eine Verfahrensstufe jedoch häufig eine sehr große Bandbreite von Lastfällen abdecken, die den Betrieb in suboptimalen Wirkungsgradbereich bedingen. Eine Betrachtung von Mittelwerten für so lange Zeiträume wie einem Jahr bildet viele Betriebszustände nicht vollständig ab. Verschlechterungen von Wirkungsgraden sind nur durch vertiefte Analyse der Betriebszustände, z. B. für Pumpen und Gebläse, zu identifizieren, wofür eine deutlich größere (Messwert-) Datendichte hilfreich sein kann. Das würde auch für die unterjährige Optimierung förderlich sein, um an einzelnen Verfahrensstufen noch bestehende Potenziale zu heben.

Eine Unterschreitung der berechneten anlagespezifischen Idealwerte in der Praxis ist auch möglich, wenn beispielsweise unerkannte verfahrenstechnische Reserven identifiziert oder alternative und energetisch günstigere technische Lösungen gefunden werden. Letzteres betrifft z. B. die Vermeidung einer Hebestufe durch verfahrenstechnische Änderungen oder durch Erübung von Rührwerken bei Umstellung auf Impulsbelüftung in den anoxischen Zonen. In der Praxis zeigt sich auch, dass gelegentlich Unterschreitungen der berechneten Idealwerte durch Abschalten von für verzichtbar gehaltenen Aggregaten möglich sind, z. B. wenn Schraubenschaufler neben der Umwälzung durch Heizschlammpumpen vorzufinden sind und auf den Betrieb der Schraubenschaufler (weitgehend) verzichtet wird.

Die Messung der elektrischen Kennwerte wie Stromstärken, (tatsächliche) Spannungen, Leistung (Wirk- und Blindleistung) sowie elektrische Arbeit erfolgte auf vielen Kläranlagen bisher an nur wenigen Verfahrensstufen oder Aggregaten. Für die Energieanalysen muss dann häufig auf temporäre Handmessungen von Strom und Spannung zurückgegriffen werden, die nur Ausschnitte des jährlichen Betriebsverhaltens oder der Lastfälle repräsentieren. Vielfach sind auch Handmessungen nicht möglich, sodass die aufgenommene Leistung basierend auf Betriebsstunden, die häufig geschätzt werden, angenommen wird. Damit sind zwangsläufig Fehler bei der energetischen Aufnahme des IST-Zustandes verbunden, die sich dann in der Kennwertberechnung und Bilanzierung niederschlagen.

Bei den Betrachtungen zur Wärme wurde bisher ebenfalls sehr oft und verbreitet mit Annahmen und Schätzwerten gearbeitet, da häufig Wärmemengenzähler und Temperaturmessungen fehlen. Auch sind die Berechnungen für die Analyse des Wärmebedarfs und dessen Optimierung oder Minimierung bei vertiefter detaillierter Betrachtung recht aufwändig und kompliziert. Zudem spielte das Thema Wärme bisher nur eine untergeordnete Rolle, was sich nun aufgrund des vermehrten Wärmebedarfes für die Schlammertrocknung auf zahlreichen Anlagen ändern wird.

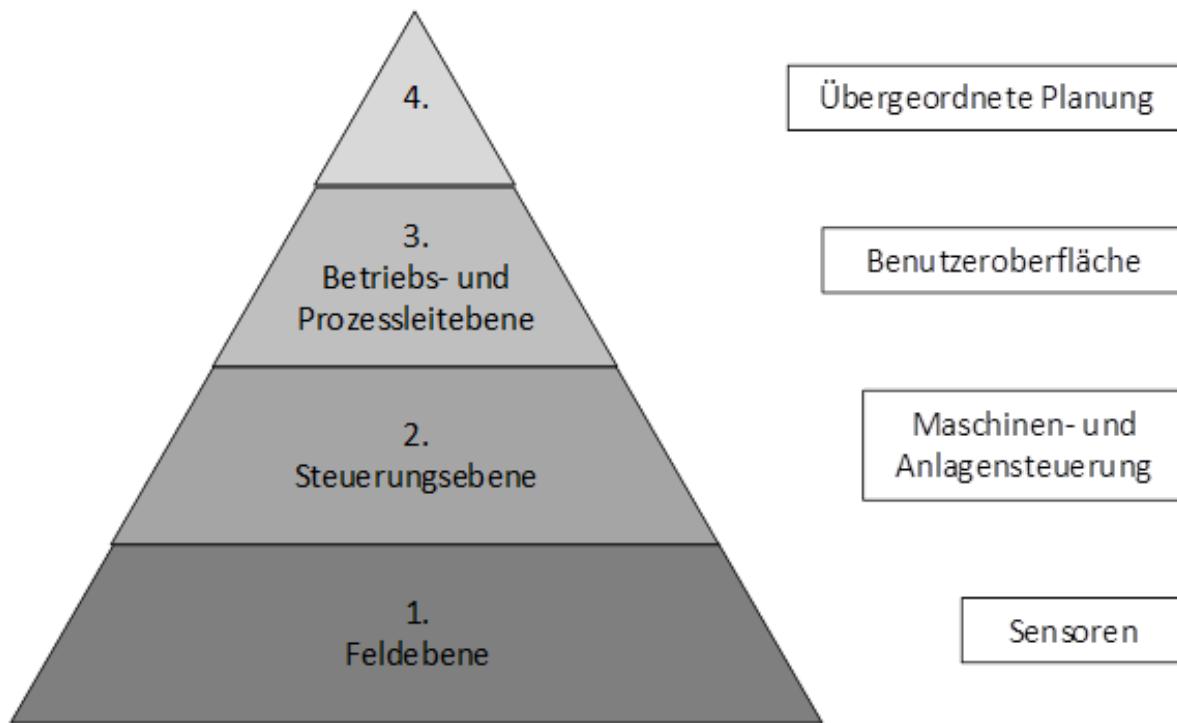
2.3.2 Datenerfassung auf Kläranlagen – Methoden, Systeme und Visualisungsformen

2.3.2.1 Erfassungsebenen zum Informationsaustausch

Die Prozessbeobachtung sowie ihre Bedienung geschehen im Kläranlagenbetrieb über Leitsysteme (Pinnekamp et al., 2017). Diese lassen sich in verschiedene Ebenen unterteilen. Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt die „funktionalen Automatisierungsebenen“, die den (hierarchischen)

Informationsaustausch zwischen der Feld-, Steuerungs-, Betriebs, Prozessleit- und Unternehmensebene ermöglicht (Roth, 2016).

Abbildung 1: Automatisierungsebenen nach Pinnekamp et al., 2017 und Roth, 2016



4. = Unternehmensebene

(Quelle: Pinnekamp et al., 2017; Roth, 2016)

Die erste Ebene ist die Feldebene. Sie umfasst Sensoriken, die der Verarbeitung von Ein- und Ausgangssignalen dienen. Das können beispielsweise Temperaturfühler, Lichtschranken oder elektrische Sensoren/Messgeräte sein (Roth, 2016; Pinnekamp et al., 2017). Die darauffolgende „Steuerungsebene“ verarbeitet die von der Feldebene zur Verfügung gestellten Eingangssignale als dezentrale Maschinen- und Anlagensteuerungsebene. Eine dritte Ebene (Betriebs- und Prozessleitebene) beinhaltet eine Benutzeroberfläche als Bedien- und Beobachtungssystem für das Betriebspersonal. Es werden Steuerungsoptionen sowie Warnmeldungen des Prozessleitsystems visualisiert. Die vierte Ebene (Unternehmensebene) dient der übergeordneten (Unternehmens-)Planung (Humoreanu und Nascu, 2012). Sie wird in diesem Bericht nicht weiter betrachtet.

Eine klare Abgrenzung der unterschiedlichen Level ist durch die Einführung von beispielsweise intelligenten Sensoren deutlich komplexer geworden, denn sie sind in der Lage, Messdaten direkt zu verarbeiten und einfache Regelungsaufgaben selbst zu übernehmen. (Pinnekamp et al., 2017)

2.3.2.2 Datennutzung und Methoden

Die gesammelten Daten wurden bisher überwiegend nur für die einfache Regelung und Überprüfung der Reinigungsleistung verwendet (Dürenmatt, 2012), zunehmend jedoch auch zur Auswertung und Sichtbarmachung energetischer Kennwerte. Durch die breite Verfügbarkeit von günstigen Datenspeichern und einem Anstieg in der Leistungsfähigkeit handelsüblicher Rechner

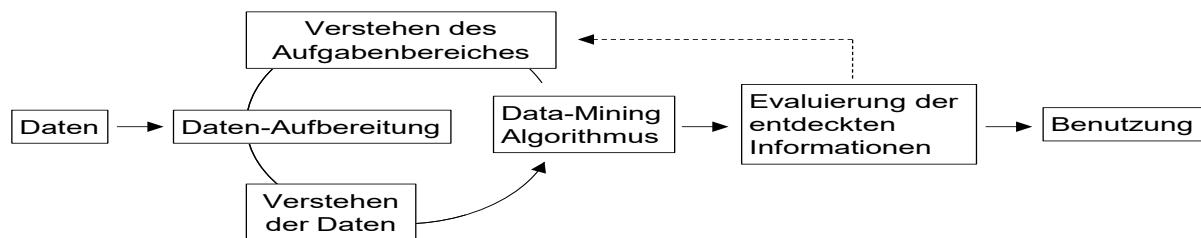
wird es für Betreiber immer einfacher, große Messdatenmengen zu akkumulieren und über lange Zeiträume zu archivieren (Maimon und Rokach, 2005).

Die gesammelte Datenmenge wächst zumeist schneller an als sie analysiert werden kann (Dürrenmatt, 2012). Zusätzlich gehen Informationen verloren, die nicht durch klassische (statistische) Ansätze erkannt oder durch das menschliche Auge erfasst werden können. Eine mögliche Lösung sind Data-Mining-Verfahren. Eine für Kläranlagen passende Definition findet sich bei Linoff und Berry. Sie definieren Data Mining als „Exploration und Analyse großer Datenmengen mit automatischen oder halbautomatischen Methoden, um neue und bedeutungsvolle Muster und Regeln zu entdecken“ (Linoff und Berry, 2011). Das Verfahren bedient sich statistischer Methoden, dem maschinellen Lernen, künstlicher Intelligenz, der Mustererkennung sowie Datenbanktechnologien, um einen schon vorhandenen Datensatz durch ein einfach zu interpretierendes Modell ausreichend genau zu beschreiben (Cios et al., 2007).

Anhand von Beschreibungs- und Prognoseproblemen werden Informationen für die Prozessoptimierung, Ressourceneinsparung oder Sensorüberwachung ausgewertet (Dürrenmatt, 2012). Beispiele für Beschreibungsprobleme sind die Bildung von Datengruppen durch Clusteranalysen oder die Auffindung von Zusammenhängen und Abhängigkeiten zwischen Variablen als Assoziationsanalysen. Die gesammelten Daten werden für die dynamische Überwachung und Beurteilung entsprechender Kennwerte visuell aufbereitet oder für eine tiefergehende Energieanalyse hinsichtlich Optimierungspotenzial und Leistungsreserven der Kläranlage näher betrachtet (Dürrenmatt, 2012).

Auf Kläranlagen stellt sich die Datenanalyse aufgrund der großen Dynamiken im Reinigungsprozess sowie variierender Zeitintervalle für Messungen als komplex dar. Erschwert wird die Analyse von Messdaten durch zusätzliche Einflussfaktoren wie z. B. Änderungen im Einzugsgebiet bzw. der Abwasserbehandlungsanlage selbst (z. B. durch betriebliche oder bauliche Veränderungen). Zusätzlich müssen die gesammelten Daten eine ausreichende Qualität aufweisen. Häufig sind diese lückenhaft, verrauscht oder außergewöhnliche Ereignisse (z. B. die Kalibrierung eines Sensors) werden nicht dokumentiert. Entsprechend müssen die Daten vor der Verwendung aufbereitet werden. Es können nur Algorithmen verwendet werden, die mit verrauschten Daten arbeiten können. Abbildung 2 zeigt ein auf den Kläranlagenbetrieb angepasstes Prozessmodell, bestehend aus sechs interaktiven und iterativen Phasen (Dürrenmatt, 2012).

Abbildung 2: Data-Miningprozess nach Dürrenmatt, 2012



(Quelle: Dürrenmatt, 2012)

Die ersten vier Phasen sind iterativ und beschäftigen sich mit dem Verstehen des Aufgabenbereiches und der Daten, der Datenaufbereitung und der Analyse durch einen Data-Mining-Algorithmus (Dürrenmatt, 2012). In der ersten Phase werden das Projektziel und die Erfolgskriterien festgelegt. Alle wichtigen weiteren Einflussfaktoren werden hier zusammengetragen. Es erfolgt eine Vorauswahl von Data-Mining-Tools und -Techniken. Gefundene Ziele werden in die Data-Mining-Sprache „übersetzt“. In Phase 2 bis 3 werden relevante Daten zusammengetragen und aufbereitet. Die Messdaten werden gereinigt (z. B. durch Elimination von Ausreißern und

Datenlücken) und an den Algorithmus angepasst. Dieser Schritt benötigt rund 50 % des Arbeitsaufwandes, da in einem iterativen Prozess eine passende Kombination aus Datenaufbereitung und Data-Mining-Algorithmus gefunden werden muss (Cios et al., 2007). Die Messwerte werden in Phase 4 analysiert. Entspricht das Ergebnis nicht den Anforderungen, müssen die Parameter über die Datenaufbereitung (Phase 3) erneut angepasst werden (Dürrenmatt, 2012). Die letzten beiden Phasen beschäftigen sich mit der Evaluierung der gefundenen Informationen im Gesamtkontext der Kläranlage, ihrer Dokumentation und den strategischen Überlegungen für die Implementierung der Ergebnisse in den Kläranlagenbetrieb.

Das Werkzeug Data-Mining ist geeignet, um tiefergehende Zusammenhänge und Muster zwischen verschiedenen Prozessen, Kennwerten usw. zu erkennen und sichtbar zu machen – z. B. zwischen energetischen Parametern und Prozessparametern. Unabhängig davon sind viele Daten oder Messwerte direkt für die Auswertung und Visualisierung energetischer Parameter nutzbar. So ist beispielsweise der momentane Eigenversorgungsgrad eine Kennzahl mit modifiziertem Bezugsparameter, der auf momentanem Gesamtstromverbrauch und momentaner Eigenenergieerzeugung basiert.

2.3.2.3 Möglichkeiten der Visualisierung

Direkt verwendbare Daten bzw. die über Data-Mining gefundene Ergebnisse sollten transparent anhand von leicht zu interpretierenden Modellen kommuniziert bzw. in den laufenden Kläranlagenbetrieb integriert werden (Kaufmann et al., 2015). Sogenannte Dashboards bieten eine leistungsstarke Methode zur Visualisierung von energetisch relevanten Informationen. Aufbereitete Daten werden in Form von Prozess- oder Energieindikatoren anhand unterschiedlicher Diagrammformen o. ä. dargestellt. Anlagenbetreiber erhalten so einen schnellen Einblick in aktuelle Sachverhalte.

Die Darstellungsweise erfolgt auf diesen Dashboards in unterschiedlicher Weise mit unterschiedlichem Nutzer- und Betrachterkomfort. Daher wurden die im Rahmen der Literaturrecherche betrachteten kommerziell verfügbaren Systeme mit Hilfe von definierten Kriterien verglichen. Diese Bewertungskriterien sind Intuition (I), Transparenz (T), Mustererkennung (M) und Vergleichbarkeit (V). Zusätzlich wurde eine farbliche Abstufung vorgenommen, die den Erfüllungsgrad der Kriterien wiedergibt (Dürrenmatt und Thürlimann, 2016).

Die Definition der Farben sowie die vier verwendeten Bewertungskriterien orientierten sich an dem Dokument „Daten in Abwasserreinigung: Energiedaten zu Analyse und Überwachung Betrieb“ der VSA-Fachtagung, Windisch, 14 Januar 2016 (Dürrenmatt und Thürlimann, 2016). Eine genaue Definition für verwendete Begriffe im Zusammenhang mit der Bewertung von Darstellungsvarianten konnte dem Dokument nicht entnommen werden. Anhand der im Dokument gegebenen Abbildungen und Bezeichnungen wurden daher eigene Definitionen für die Bewertungskriterien Intuition (I), Transparenz (T), Mustererkennung (M) und Vergleichbarkeit (V) entwickelt (Bielfeldt, 2021).

Tabelle 3 zeigt die Bewertungskriterien in ihrer farblichen Darstellung. Die Farbe Gelb steht für das schlechte oder Nicht-Erfüllen der Kriterien. Eine hellgrüne Kennung gilt für die teilweise Erfüllung und eine grüne Farbe für die vollständige Erfüllung der Kriterien. (Dürrenmatt und Thürlimann, 2016).

Tabelle 3: Bewertungskriterien nach Dürrenmatt und Thürlimann, 2016

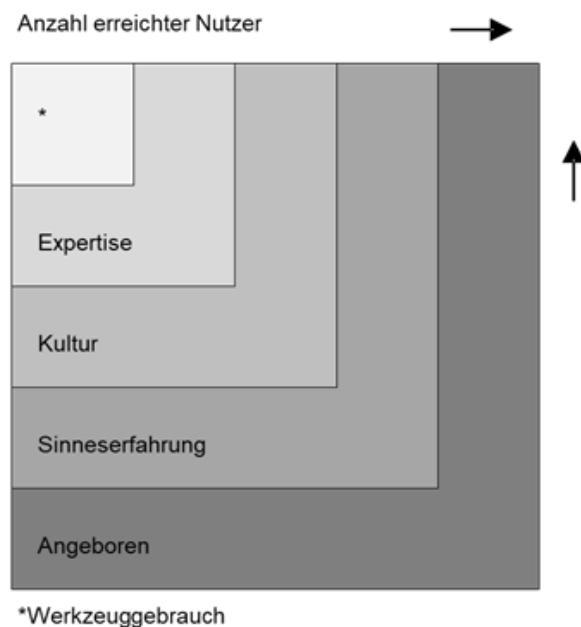
	erfüllt Kriterium schlecht oder gar nicht
	erfüllt Kriterium teilweise
	erfüllt Kriterium

(Quelle: Dürrenmatt und Thürlimann, 2016)

Die Zuordnung der geschilderten farblichen Abstufung unterlag einer gewissen subjektiven Einschätzung des Betrachtenden bzw. desjenigen/derjenigen, der die Bewertung vornahm. Tendenziell wurde damit dennoch eine zutreffende qualitative Bewertung erreicht.

Eine Definition des Begriffes Intuition (I), insbesondere unter dem Gesichtspunkt von Benuteroberflächen, war in der Fachliteratur nicht klar belegt (Hurtienne et al., 2006). Angesichts der Vielzahl an unterschiedlichen Interpretationen, wurden die betrachten Darstellungsvarianten in dieser Arbeit nach den „Ebenen des Vorwissens“ aus dem Paper von Hurtienne et al. (2006) bewertet.

In Abbildung 3 werden die fünf verschiedenen Ebenen des Vorwissens dargestellt. Sie sind unterteilt in die Kategorien angeborenes Wissen, Sinneserfahrungen, kulturell erlangtes Wissen, weiterführende Expertise und Werkzeuggebrauch. Die Anzahl der erreichten Nutzer sank mit dem Anstieg des Spezialisierungsgrades. Angeborenes bis kulturelles Wissen stützte sich auf Reflexe, Instinkte oder übertragbare alltägliche Erfahrungen, die durch die Gesellschaft und Kultur vermittelt wurden. Die Ebenen Expertise und Werkzeuggebrauch beschreiben Vorwissen auf einem Spezialgebiet, welche z. B. aus dem beruflichen Kontext bekannt ist. (Hurtienne et al., 2006)

Abbildung 3: Ebenen des Vorwissens nach Hurtienne et al., 2006

(Quelle: Hurtienne et al., 2006)

Ein Dashboard galt als intuitiv (I), wenn kein weiterführendes Wissen benötigt wurde, um eine Darstellung interpretieren zu können. Mit zunehmendem Fachwissen sank die Anzahl der in

Frage kommenden Anwendende Wenn eine zusätzliche Expertise vorausgesetzt war, um eine Darstellung interpretieren zu können, galt das Kriterium für ein intuitiv verständliches Dashboard als nicht erfüllt (gelb). Wurde angenommen, dass etwas über den kulturellen Hintergrund oder durch Sinneserfahrungen verständlich war, galt das Kriterium als erfüllt (hellgrün bis grün). (Bielfeldt, 2021)

Eine Darstellung wurde als transparent (T) definiert, wenn sie eine genauere Betrachtung eines aktuellen Zustandes oder die Nachverfolgung eines Ereignisses ermöglichte. Für die Bewertung wurden Fachkenntnisse im Bereich der Abwasseraufbereitung durch den Betreiber vorausgesetzt. Das Kriterium erhielt eine positive Bewertung (hellgrün bis grün), wenn die Darstellung durch Filter, farbliche Kennungen oder einfache grafische Elemente (z. B. Pfeile) zusätzlich unterstützt wurde. (Bielfeldt, 2021)

Das Kriterium der Vergleichbarkeit (V) galt als erfüllt, wenn sich Messdaten untereinander in Bezug setzen ließen. Die Bewertung konnte sich auf hellgrün bis grün verbessern, wenn die Vergleichbarkeit durch weitere Darstellungsweisen unterstützt wurde oder Variablen mit unterschiedlichen Einheiten in einen Bezug gesetzt werden konnten. Die Voraussetzung für eine Gegeüberstellung war ein entsprechend hochauflöster Graph. Die Visualisierung konnte z. B. unterstützt werden durch Farbskalen, durch eine höhenproportionale Darstellung von Diagrammwerten oder die Kenntlichmachung eines außergewöhnlichen Zustandes und damit die Abweichung von einem (normalen) Verhalten (Bielfeldt, 2021).

Stellte ein Dashboard Werte über einen längeren Zeitraum dar und es ließen sich Regelmäßigkeiten oder Wiederholungen identifizieren, wurde das Kriterium für die Mustererkennung (M) erfüllt. Zu einer positiven Bewertung (hellgrün bis grün) kam es, wenn das Auffinden durch Farben oder einer geschickten Anordnung der Graphen zusätzlich unterstützt wurde. Grundvoraussetzung war eine ausreichend detaillierte Auflösung sowie ein genügend großer Betrachtungszeitraum (Bielfeldt, 2021).

2.3.2.4 Grafische Darstellungsformen für Dashboards

2.3.2.4.1 Zahlenwerte

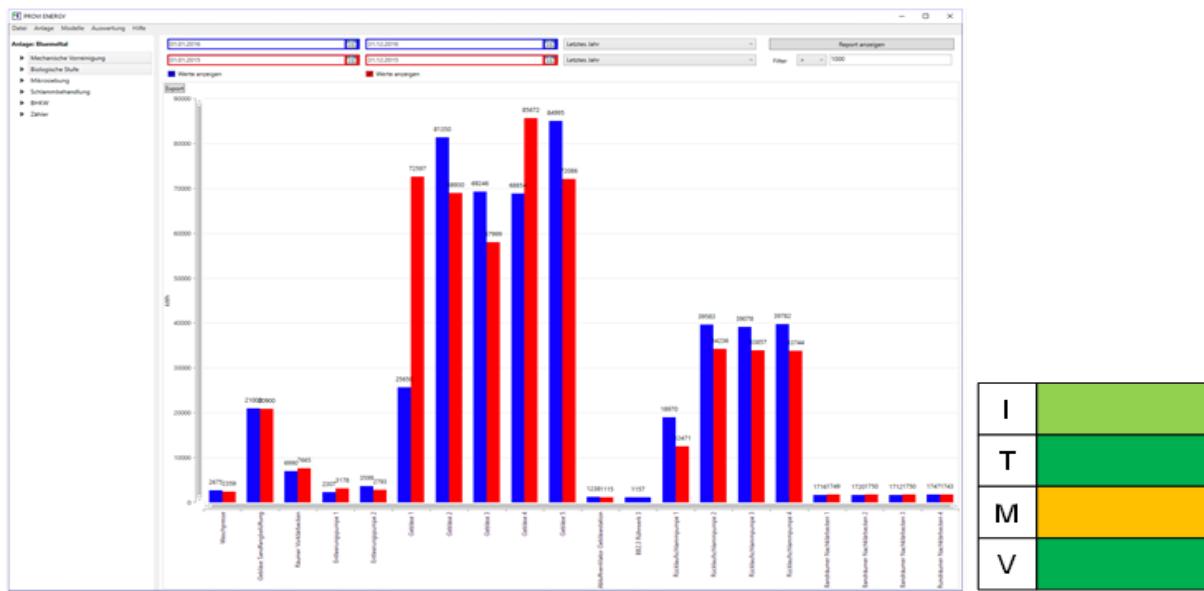
Ein einzelner Zahlenwert war die einfachste Art, einen Prozess- oder Energieindikator darzustellen. Die richtige Interpretation einfacher Zahlenwerte bediente sich der Vorkenntnisse des Betrachters im Bereich der Abwasseraufbereitung. Ein intuitives (I) Verständnis war ohne diese Expertise nur "schlecht oder gar nicht" möglich (Hurtienne et al., 2006).

2.3.2.4.2 Säulen- und Kreisdiagramm

Ein Säulendiagramm konnte zur vergleichenden Darstellung von Prozess- oder Energieindikatoren verwendet werden (Meyer, 2017). Die Größe der auf der Abszissenachse angeordneten Säulen veranschaulicht die Höhe der Werte und lässt sich durch eine Kennung identifizieren. Der Maßstab der Ordinatenachse variiert mit der Wahl der zu visualisierenden Variablen. Ein Säulendiagramm des Jahresstromverbrauchs einer Kläranlage sowie die Bewertung der Kriterien ist in Abbildung 4 dargestellt.

Ein Kreisdiagramm hätte als abweichende Darstellungsform für den Vergleich von Prozess- oder Energieindikatoren verwendet werden können. Sie ist hierbei jedoch auf die Visualisierung der prozentualen Verteilung von Werten begrenzt. Ein direkter Vergleich (V) von Werten zu unterschiedlichen Zeitpunkten, wie bei einem Säulendiagramm, ist innerhalb eines Kreisdiagrammes daher nicht möglich.

Abbildung 4: Jahresstromverbrauch einer Kläranlage dargestellt als Säulendiagramm mithilfe des Programmes PROVI ENERGY

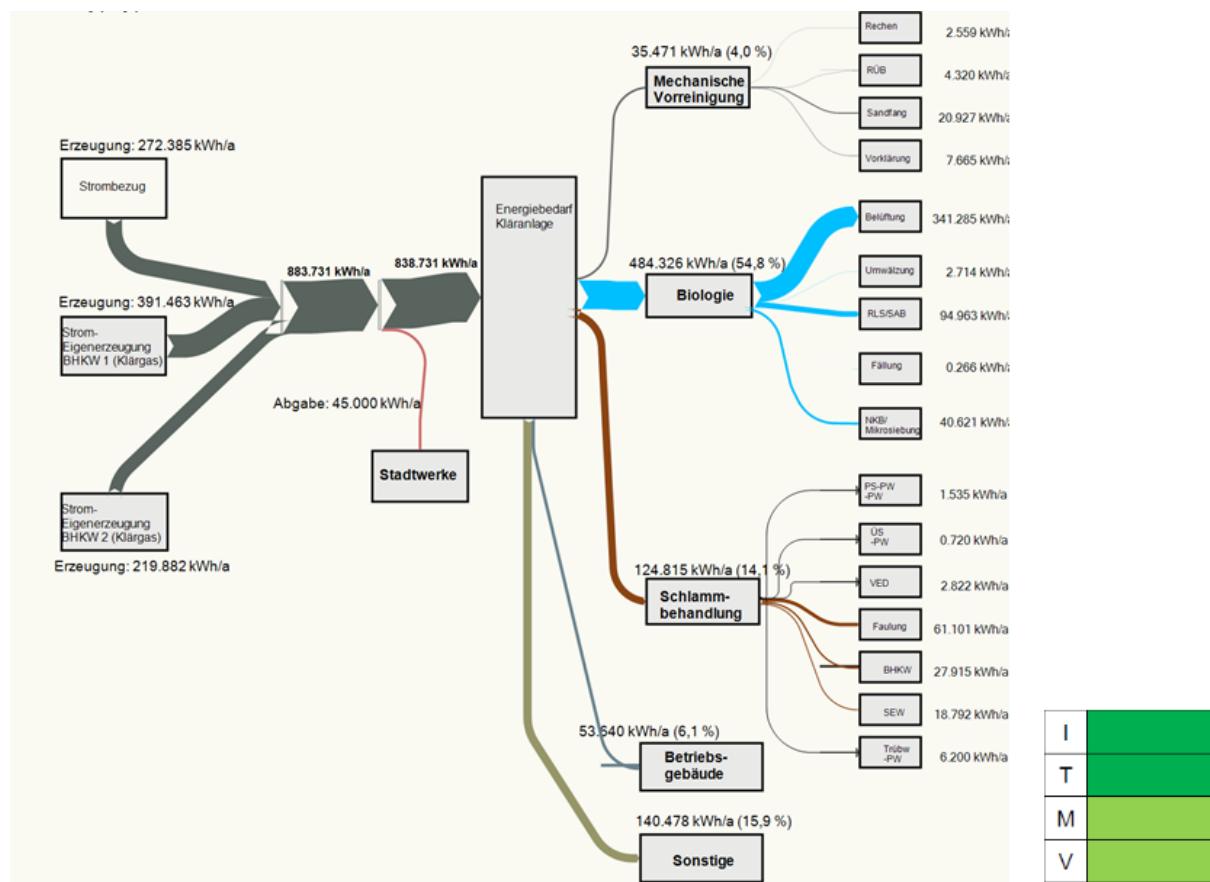


(Quelle: Meyer, 2017; Bielfeldt, 2021)

2.3.2.4.3 Sankey-Diagramm

Eine inhaltlich identische, aber deutlich intuitiver (I) verständliche Darstellungsweise ist die Visualisierung des Stromverbrauchs durch ein Sankey-Diagramm. Alternativ zu Balken- oder Kreisdiagrammen wird die Verbraucherliste transparent (T) anhand eines Energieflossdiagramms durch mengenproportional dicke Pfeile ausgedrückt. Es ist daher kein zusätzliches Wissen nötig, um den Bezug der verschiedenen Verfahrensstufen untereinander zu erkennen. Zusätzlich können über einen gerichteten Graphen, d. h. allen Kanten ist eine reelle Zahl als Kantengewicht zugeordnet, komplexe Zusammenhänge auf einfache Weise veranschaulicht werden. Gewichtete Kanten visualisieren den Mengenfluss. Reinigungsstraßen und Verfahrensstufen werden separat oder gemeinsam als Zwischenstufen durch Konten dargestellt. Die Dicke der Pfeile ist ähnlich der höhenproportionalen Darstellung eines Säulendiagramms und erfüllt damit auch das Kriterium einer verbesserten Vergleichbarkeit (V). Abbildung 5 zeigt den Stromverbrauch einer Kläranlage als Sankey-Diagramm sowie die farbliche Bewertung der Kriterien (Meyer, 2017; Schmidt, 2006; Bielfeldt, 2021).

Abbildung 5: Stromverbrauch einer Kläranlage dargestellt als Sankey-Diagramm mithilfe der Software PROVI ENERGY

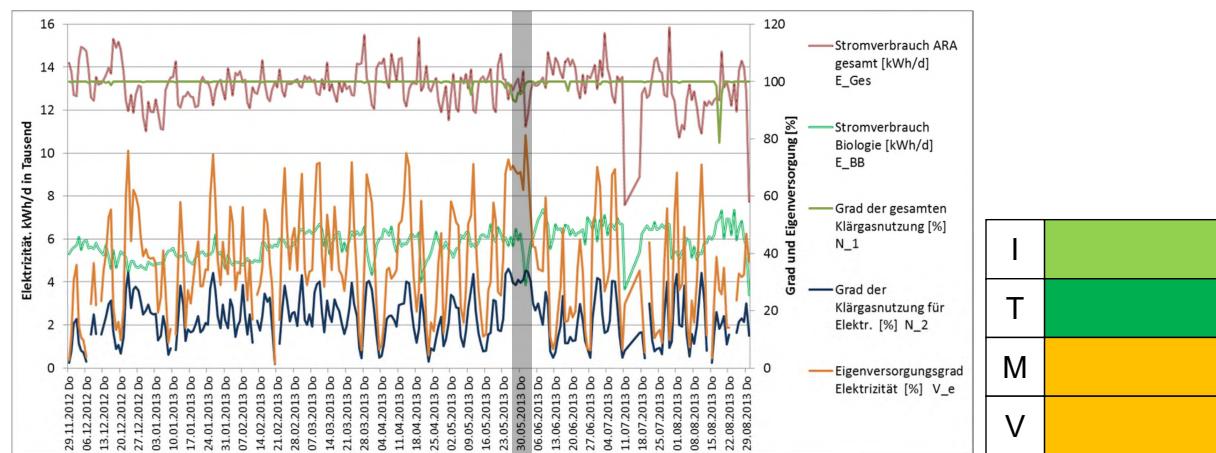


(Quelle: BITControl GmbH, 2022)

2.3.2.4.4 Liniendiagramm

Ein Liniendiagramm ist die Visualisierung des funktionellen Zusammenhangs zweier Merkmale als Diagramm in Liniengröße. Liniendiagramme können zur Darstellung unterschiedlicher Prozess- und Energieindikatoren herangezogen werden. Der auf der Abszissenachse abgebildete Wert entspricht in nahezu allen betrachteten Fällen einer Zeitreihe. Die Wahl der Variablen der Ordinatenachse variiert stark. In Liniendiagrammen sind mehrere Parameter mit gleicher Bezugsgröße (meist der Zeit) parallel abbildbar.

Es konnte argumentiert werden, dass es auch einem weniger geschulten Benutzenden möglich ist, eine intuitive (I) Rückmeldung zu geben. Lag ein Wert beispielsweise außerhalb seines „natürlichen“ Spektrums, konnte diese Fluktuation ein Indiz für ein außergewöhnliches Ereignis sein. Ohne ein weiterführendes Fachwissen konnte dieses Auftreten aber nicht als „gut“ oder „schlecht“ bewertet werden. Eine langfristige Speicherung der Daten erleichterte die Nachverfolgung von diversen Ereignissen und sorgte auch bei Wechselwirkungen mit anderen Verfahrensstufen für eine höhere Transparenz (T) (Dürrenmatt, 2012). Ein beispielhaftes Liniendiagramm sowie die Bewertung sind in Abbildung 6 dargestellt. Zu beachten ist, dass bei diesem Beispiel durch die grobe Auflösung wichtige Details für die Vergleichbarkeit (V) schwer zu identifizieren sind. Obwohl ein ausreichend langer Betrachtungszeitraum vorhanden war, kann argumentiert werden, dass eine Aussage über die Mustererkennung (M) lediglich auf sehr oberflächlichem Niveau und nur schlecht oder gar nicht möglich ist (Bielfeldt, 2021).

Abbildung 6: Verschiedene Energiekennzahlen einer Kläranlage dargestellt als Liniendiagramm

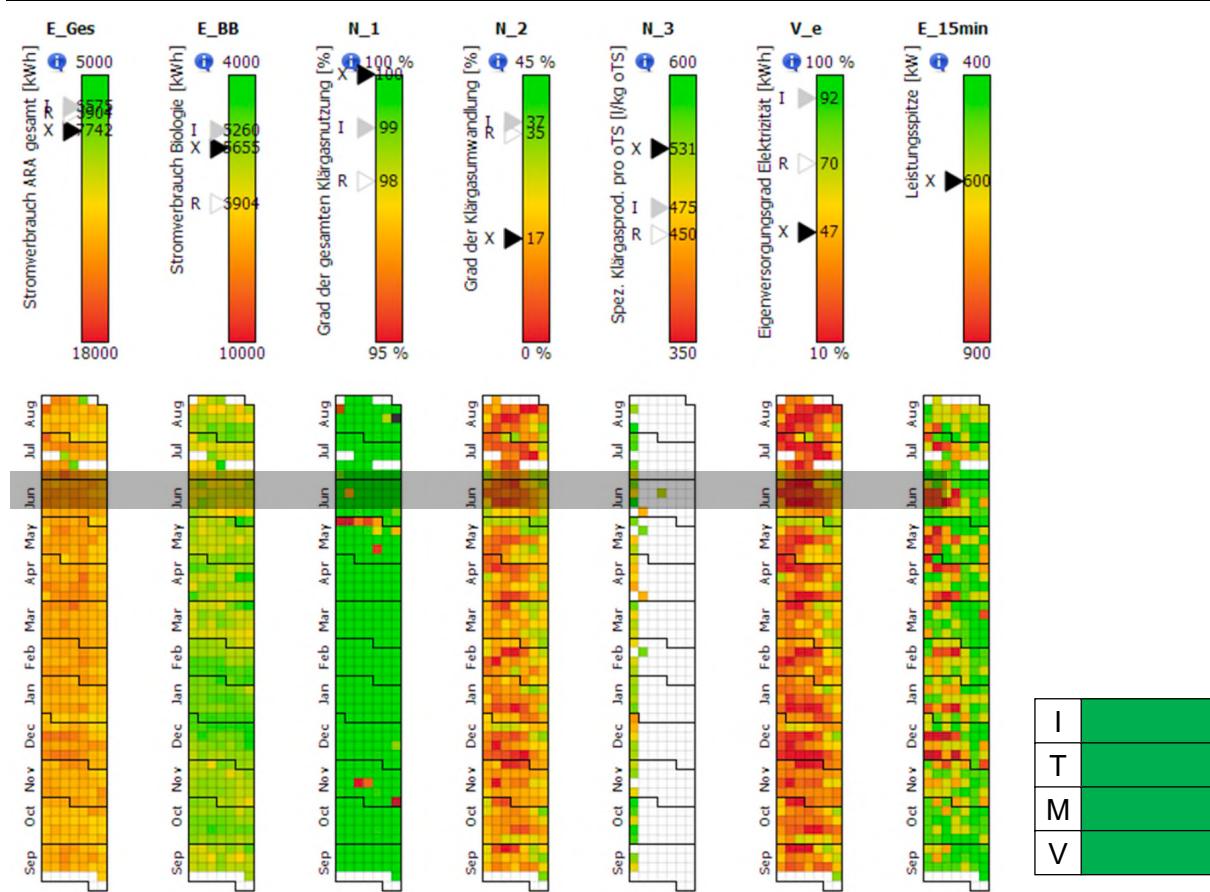
(Quelle: Thürlimann et al., 2015)

2.3.2.4.5 Teppichdiagramm

Die Kodierung von Datensätzen nach vorher festgelegten Farben führt eine neue Ebene in die Kommunikation von Prozess- und Energieindikatoren ein. Jede Farbe ist einem bestimmten numerischen Wert(-bereich) zugeordnet und kann durch zusätzliche Markierungen (z. B. Ideal-, Richtwert und Messwert) ergänzt werden. Eine Farbskala von Blau (tiefe Werte) über Gelb zu Rot (hohe Werte) wird typischerweise für die Darstellung von Intensitäten verwendet. Parameter im Bereich von „sehr erwünscht“ bis „sehr unerwünscht“ werden durch die Farbpalette Grün über Orange bis Rot visualisiert (Bielfeldt, 2021; von Känel und Braun, 2014).

Zudem orientieren sich die Darstellungen an der EU-Energieverbrauchskennzeichnung für Haushaltsgeräte. Die Kalenderansicht basiert auf einer Idee von Wicklin und Allison aus der Arbeit „Congestion in the sky: visualizing domestic airline traffic with SAS software“ (Wicklin und Allison, 2009). Jeder Tag entspricht einem Quadrat, das entsprechend seinem charakteristischen Tageswert (z. B. Tagesdurchschnitt) eingefärbt wird (Dürrenmatt und Thürlimann, 2016; Thürlimann et al., 2015). Wochentage sind in Spalten nebeneinander und Kalenderwochen als Zeilen untereinander angeordnet. Kann ein Wert nicht berechnet werden, bleibt das Quadrat leer. Das Beispiel in Abbildung 7 zeigt sieben Energieindikatoren über einen Zeitraum von 11 Monaten des Datensatzes. Zudem verdeutlicht die Abbildung durch die farbliche Kennzeichnung die Zeiträume erhöhter Leistungsaufnahmen, der Betrachtende erkennt somit schnell auch Muster und Zeiträume.

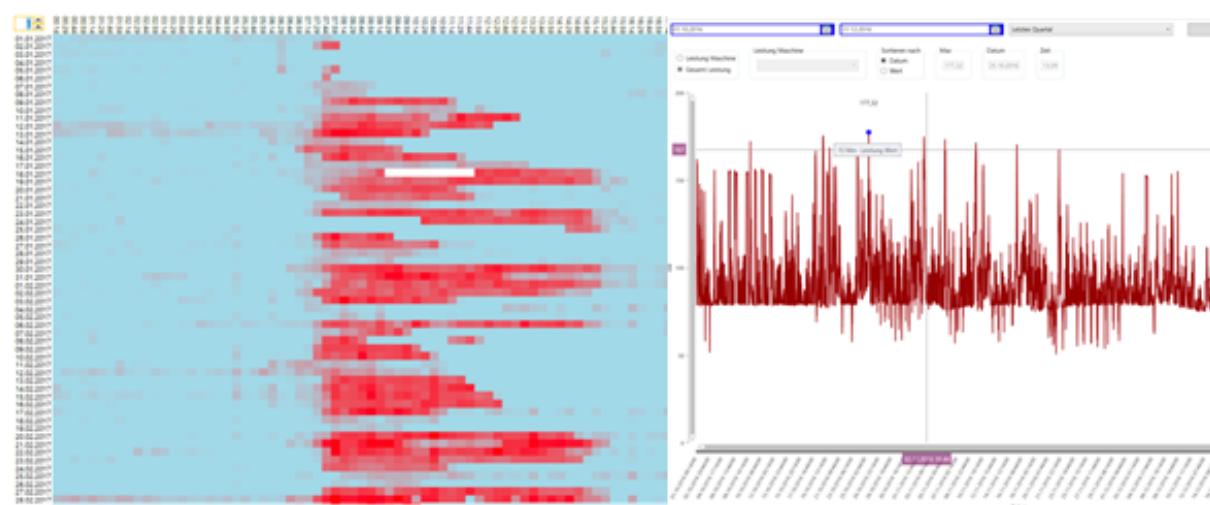
Abbildung 7: Verschiedene Energiekennzahlen einer Kläranlage dargestellt als Teppichdiagramm in der Kalenderansicht und als Farbskalensäule



(Quelle: Thürlimann et al., 2015)

Ein weiteres Beispiel für eine schnelle Mustererkennung durch Farbcodierungen bei Teppichdiagrammen ist in Abbildung 8 dargestellt. Hier ist links die Darstellungsform des Teppichdiagrammes der Darstellungsform eines Liniendiagrammes gegenübergestellt.

Abbildung 8: Verteilung der Leistung einer Kläranlage über Tag und Jahr (links) und als Liniendiagramm für ein Quartal in der Software PROVI ENERGY (rechts)



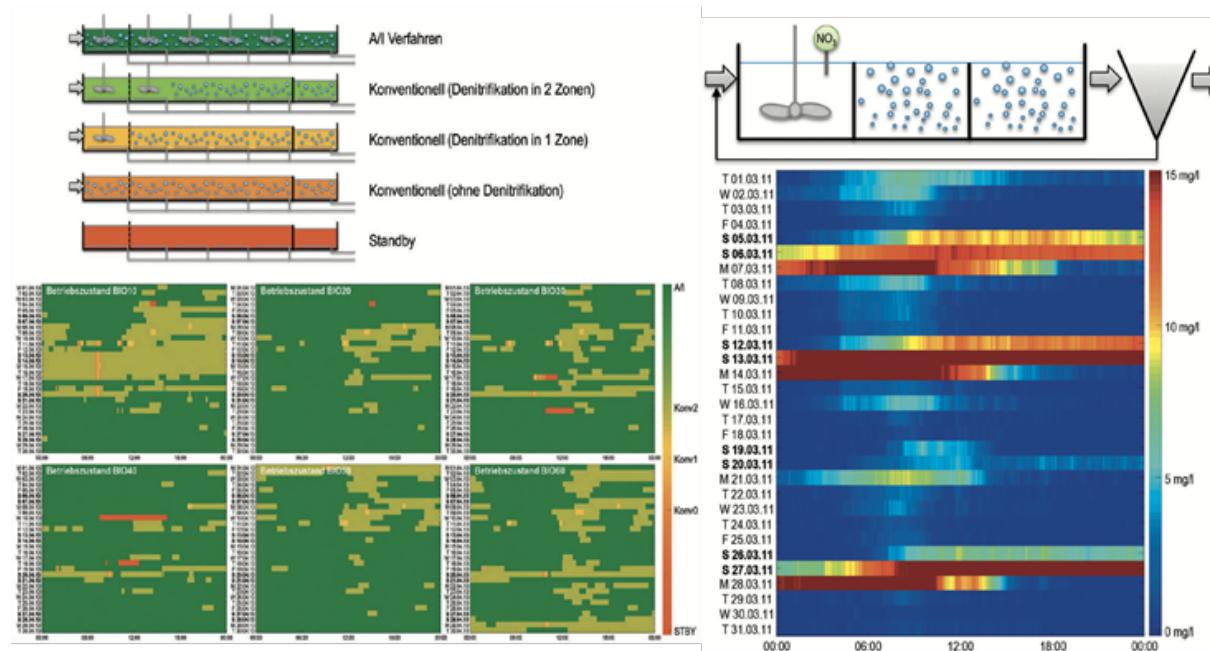
(Quelle: Meyer, 2017)

2.3.2.4.6 Betriebszustandsdiagramme

Zusätzlich zu der Visualisierung von einfachen Energiekennwerten können weitere Indikatoren helfen, energetische Schwachstellen aufzufinden. Die obere Hälfte der Abbildung 9 zeigt die Legende der Farbcodierung. Jede Zeile der sechs weiteren Graphen stellt einen Tag dar, sodass aus 30 übereinanderliegenden Zeilen ein Monat entsteht (von Känel und Braun, 2014).

Die zeitliche Auflösung der dynamischen Regelung richtet sich nach der Dauer der Teilprozesse. Basierend auf Sensordaten wechselt die Anlage ihren Betriebsmodus, wobei der Prozess auf entsprechend vorher festgelegte Parameter eingestellt wurde. Beispielsweise konnte anhand von Tabellenwerten definiert werden, welcher Sauerstoffsollwert oder welche Betriebsweise für die bivalente Zone vorgesehen war. Für einen energieeffizienten Betrieb mit einer hohen Reinigungsleistung hat der Betreiber der Kläranlage versucht, möglichst häufig den Betriebszustand des alternierend/intermittierenden Verfahrens (Dunkelgrün) der Anlage zu ermöglichen (von Känel und Braun, 2014). Entlang der Regelungsstrategie stellten Steuerungs- und Regelungsvorgänge dann für hohe Belastungen automatisch auf das konventionelle Verfahren um. Dieser Vorgang ermöglichte, dass das gesamte anfallende Abwasser behandelt werden konnte (Bielfeldt, 2021).

Abbildung 9: Monatsübersicht über den Betriebszustand der sechs Reinigungsstraßen der ARA Werdhölzli (links) und Darstellung einer kontinuierlichen Nitratmessung während eines ganzen Monats (rechts)

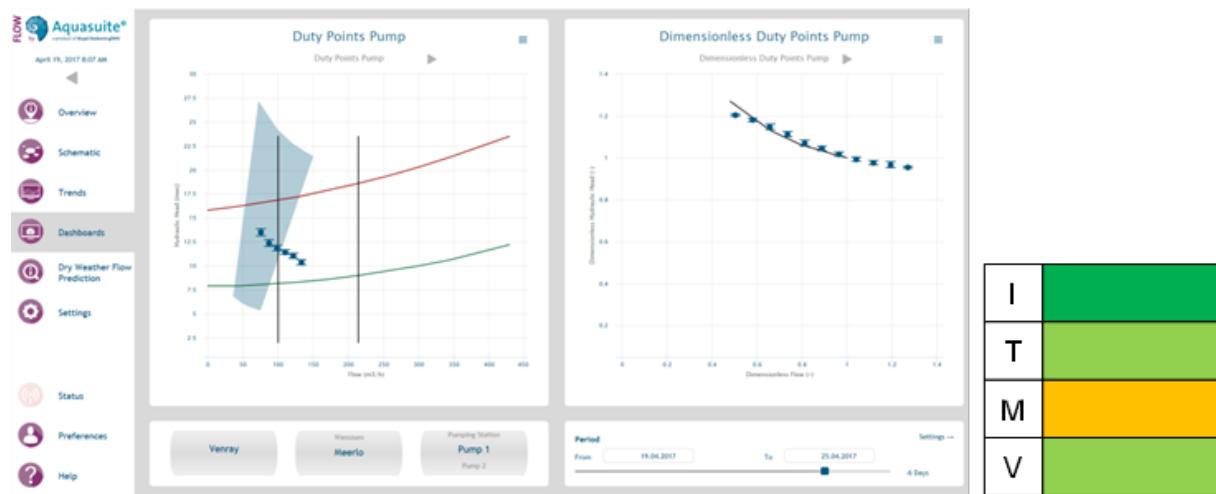


(Quelle: von Känel und Braun, 2014)

2.3.2.4.7 Kombinierte Diagramme – Detail

Neben den bisher genannten Darstellungsvarianten zur Datenvisualisierung wurden in manchen Softwareprogrammen andere Darstellungsweisen gewählt.

So konnte beispielsweise die Leistung einer ausgewählten Pumpe durch die Detailbetrachtung auf unterschiedliche Arten mit verschiedenen Informationsgehalten dargestellt werden. Beide Grafiken veranschaulichen die Betriebspunkte der entsprechenden Pumpe. Aufgetragen auf der Abszissenachse sind der Durchfluss [m^3/h] und auf der Ordinatenachse die Druckhöhe [mWS, mWC] (vgl. Abbildung 10 (links), sowie in ihrer dimensionslosen Form (rechts)).

Abbildung 10: Leistung einer ausgewählten Pumpe durch die Detailbetrachtung

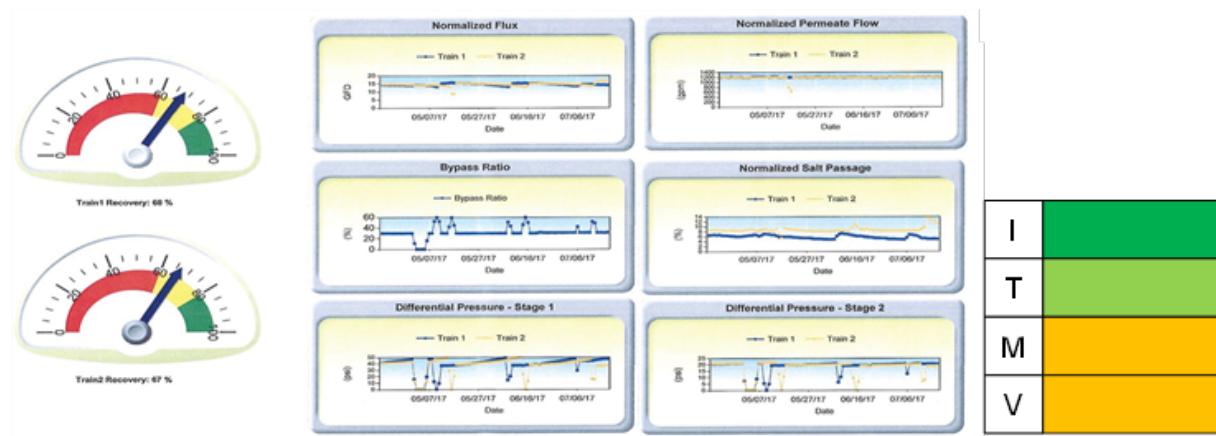
(Quelle: Lubbers et al., 2018)

Die rechte Darstellungsweise in Abbildung 10 lässt erkennen, ob sich die Betriebspunkte auf der vom Hersteller vorgesehenen Pumpkennlinie befinden. Infolgedessen kann eine Abweichung im Diagramm auf den Verschleiß des Laufrads, des Spaltrings oder auf eine Verstopfung der Pumpe hinweisen und eine Warnung auf Level 2 auslösen (Lubbers et al., 2018).

Deutlich intuitiver (I) verständlich ist die Darstellung der Betriebspunkte über den Arbeitsbereich der Pumpe (vgl. grau schraffierter Bereich in Abbildung 10, links) und seine zusätzlichen Begrenzungen durch die minimale (grün) und maximale (rot) Systemkurve. Es kann argumentiert werden, dass es keiner zusätzlichen Expertise benötigt, um den Status der Pumpe zu deuten (Hurtienne et al., 2006).

2.3.2.4.8 Tachodiagramm

Eine weitere Form sind sogenannte Tachodiagramme. Sowohl die Farben als auch die Form des Tachometers in Abbildung 11 finden vielfach Anwendung im Automobilsektor. Aus diesem Grund lässt sich die positive Bewertung des Kriteriums einer intuitiv (I) verständlichen Darstellung auch hier mit unserem kulturellen Vorwissen begründen (Hurtienne et al., 2006).

Abbildung 11: Irvine Ranch Water District (IRWD) Dashboard

(Quelle: Boyle et al., 2019)

Hier im Beispiel sind zwar qualitative Parameter in der Darstellung aufgenommen, die Darstellung ist jedoch prinzipiell auch für energetische Parameter nutzbar. Die Einordnung wichtiger

Kennzahlen in ein durch farbliche Hinterlegung ergänztes Tachodiagramm lassen eine sehr schnelle Einordnung zu. Die zusätzliche Darstellung der verwendeten Parameter in Zeitreihen erhöht die Transparenz (T). Für ein besseres Verständnis sind zusätzliche Informationen über die Berechnungsgrundlage der Statusanzeige für den Betreiber vorteilhaft (Bielfeldt, 2021).

2.3.2.5 Methode ohne zugehörige Software- ENERWATER

Die ENERWATER-Methode dient zur Bestimmung der Energieeffizienz von Kläranlagen. Sie wird genutzt, um die Energieeffizienz zu definieren und vor allem vergleichbar zu machen. Dadurch ist es nicht nur möglich Benchmarking zwischen Anlagen zu erkennen, sondern auch Hot-spots/Ineffizienz innerhalb der Anlage zu identifizieren (Longo et al., 2019).

Die Methode unterscheidet im Wesentlichen zwei Ansätze:

2.3.2.5.1 Rapid Audit (RA):

Dieser Ansatz bewertet die Energieeffizienz für drei Parameter basierend auf historischen/existierenden Daten und ist damit für eine schnelle Bewertung anwendbar. Ziel dieses Ansatzes ist es, einen Vergleich zu anderen Anlagen herstellen zu können. Der Ansatz ist vergleichbar mit einem Black-Box-System, bei dem die In- und Outputs betrachtet werden (Longo et al., 2019).

2.3.2.5.2 Decision Support (DS):

Dieser Ansatz besteht aus einer detaillierten Berechnung der Energieeffizienz mithilfe intensiven Monitorings der Energie- und Wasserqualitätsdaten in jedem Schritt. Ziel ist hierbei, sowohl die Diagnose und Identifikation der Ineffizienz als auch die Entwicklung von Methoden zur Energieeinsparung (Longo et al., 2019).

2.3.2.5.3 Vorgehen:

Das Vorgehen der ENERWATER Methode ist in (Longo et al., 2019) detailliert dargestellt und wird im Folgenden erläutert. Im Wesentlichen werden bei dieser Methode zunächst die Energiedaten bestimmt. Dafür wird der Energieverbrauch, der chemische Energieverbrauch sowie die produzierte Energie berechnet. Aus diesen Daten lassen sich dann Brutto- sowie Nettoenergieverbrauch bestimmen.

Um die Energiedaten vergleichbar, realistisch und universal machen zu können, werden im folgenden Schritt sogenannte Key Performance Indikatoren (KPI) bestimmt, die die Energie der verschiedenen Stufen der Anlage repräsentieren. Bei der Berechnung der RA beziehen sich die Key Parameter auf den Gesamtenergieverbrauch, bei DS werden diese mit dem spezifischen Verbrauch je Stufe bestimmt.

Im nächsten Schritt werden die KPI normalisiert, da diese in verschiedenen Einheiten vorhanden sind und daher auf einer vergleichbaren Basis ausgedrückt werden müssen. Dies kann mit verschiedenen Methoden oder Verteilfunktionen berechnet werden.

Die Gewichtung stellt die Bedeutung des jeweiligen KPIs in Bezug auf den Energieverbrauch dar. Dabei basiert die Gewichtung auf dem durchschnittlichen relativen Anteil der jeweiligen Stufe in der Anlage.

Im folgenden Schritt werden die Parameter aggregiert und anschließend der Water Treatment Energy Index (WTEI) bestimmt. Der letzte Schritt ist Ranking und Labeling. Durch Verteilungsfunktion der WTEI-Werte können die einzelnen Perzentile als Indikator für die Energieeffizienz genutzt werden, um ein Label für die Effizienz zu definieren. Die Unterteilung wurde nach EU-Effizienz Standards entschieden. Bei der Berechnung durch DS werden die Labels für die einzelnen Stufen (Brutto/Netto), bei RA nur für Brutto/Netto-Verbrauch berechnet (Longo et al., 2019; University Cranfield, 2018).

Tabelle 4: Vorgehen ENERWATER Methode nach University Cranfield, 2018

1) Bestimmung der Energiedaten	<ul style="list-style-type: none"> • Energieverbrauch • chemischer Energieverbrauch • produzierte Energie
2) Bestimmung der Key Parameter Indikatoren	<ul style="list-style-type: none"> • spezifischer Verbrauch von Stufen/Schritten in der Anlage
3a) Normalisierung der Indikatoren	<ul style="list-style-type: none"> • Min-Max-Berechnung • Standardisierung • Kategorische Berechnung <p>Vergleich mit Verteilungsfunktionen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gumbel • Normal • t-Verteilung <p>→ Bestimmung der Perzentile der KPIs</p>
3b) Bestimmung der Gewichtung	<ul style="list-style-type: none"> • gleichwertig • BAP • Data driven
4) Aggregation der KPIs und Gewichtung	<ul style="list-style-type: none"> • linear • geometrisch
5) Berechnung des WTEI	
6) Ranking und Labeling	

Das System ENERWATER beinhaltet eine vertiefte statistische Aufarbeitung energierelevanter Kläranlagendaten mit dem Ergebnis eines Labelings, erlaubt jedoch nur eine eher globale Be- trachtung und berücksichtigt dabei nicht die lokalen Gegebenheiten.

Im deutschsprachigen Raum wird das System bzw. der Ansatz von ENERWATER bisher wenig genutzt (University Cranfield, 2018; Longo et al., 2019).

2.3.3 Gebräuchliche Softwarelösungen für Energiecheck, Energieanalyse und Visualisierung

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden verschiedene in Deutschland und im nahen Ausland gebräuchliche Softwaresysteme recherchiert. Diese unterscheiden sich in Komplexität und Leistungsfähigkeit. „Klassische“ Kläranlagendatenerfassungs- und Archivierungsprogramme basieren primär auf Daten des Prozessleitsystems (PLS) und können durch Handeingaben ergänzt werden. Für diese Handeingaben sollte eine Plausibilitätsprüfung zur Fehlervermeidung integriert sein. Für die genannten Programme, die meist an einen stationären Rechner auf der KA gebunden sind, gibt es Visualisierungsmöglichkeiten, aber keine weitergehende Datenverarbeitung. Die Visualisierungen der gängigen PLS-Systeme beschränken sich auf einfache Ganglinien, bestimmte Vertrauensbereiche oder Warnmeldungen (Expertenbegleitkreis, 2021).

Neben den „klassischen“ Systemen gibt es auch Systeme „zweiter“ Ordnung, die neben der Option einer zusätzlichen Handeingabe weitergehende Auswertungen und komplexe Darstellungen ermöglichen. Sie basieren ebenfalls auf den Anlagenprimärdaten und erlauben auch die Auswertung bzw. Darstellung von energetischen Parametern. Im Monitoring kommt häufig eine Leistungsüberwachung hinzu, die das Auslösen von Alarmen ermöglicht. Durch die automatische Datenerfassung, ergibt sich die Option, die Daten in Echtzeit abzurufen und sich anzeigen zu

lassen. Neben diesen zwei Entwicklungsstufen gibt es eine dritte Entwicklungsstufe mit web-basierten Lösungen. Diese können in fast jede bestehende Dateninfrastruktur integriert werden. Die Dateneingabe ist sowohl manuell, zum Beispiel über eine App, oder direkt über diverse Schnittstellen mit Zählerstandsinformationen, Messwerten, Klimadaten etc. möglich. Wird die manuelle Dateneingabe gewählt, ist eine Plausibilitätspürung zur Fehlervermeidung zu integrieren. Wie auch die Systeme „zweiter“ Ordnung ist ein Monitoring und die Möglichkeit der Alarmerierung vorhanden.

In den folgenden Kapiteln werden einige dieser Softwaresysteme für Energieanalysen und Visualisierung vorgestellt und erläutert. Jedoch handelt es sich dabei nicht um vollständige Energieanalysen nach dem DWA-A 216, sondern lediglich um Ausschnitte daraus. Weitergehende Arbeiten, wie beispielsweise die Entwicklung von Maßnahmen und deren Bewertung, wie sie eine vollständige Energieanalyse beinhaltet, müssen manuell durchgeführt werden.

2.3.3.1 ACRON der Firma DataForum Software GmbH

Die Software ACRON der Firma DataForum Software GmbH wird europaweit von der Firma ViDEC Data Engineering GmbH vertrieben. Diese Software ist in der Lage, Berichte aus gespeicherten Prozessdaten über einen wählbaren Zeitbereich zu erstellen. Die Daten können hierbei manuell eingegeben oder über diverse Schnittstellen und Datenbanken übertragen werden. Das System ist unter anderem koppelbar mit Produkten (SPS) von Siemens, Phoenix, Schraml, GE. (DataForum Software GmbH, o.J.; ViDEC Data Engineering GmbH, 2018).

Mit ACRON können zusätzlich zu den Berichten auch Trends, Diagramme und Analysen zur Auswertung der Daten erstellt werden (DataForum Software GmbH, o.J.).

Energetische Analysen und Kennzahlen können prinzipiell auch ermittelt werden, erfordern jedoch manuelle Programmierschritte.

Vorteile dieses Softwareproduktes sind unter anderem die leichte Handhabung und Flexibilität des Systems. Außerdem ist dem Hersteller eine hohe Datensicherheit wichtig (DataForum Software GmbH, o.J.; ViDEC Data Engineering GmbH, 2018).

Das System ist sehr zahlreich in verschiedenen Kläranlagen in Europa installiert. Beispiele sind Deutschland (z. B. Breisach, Alsdorf), Österreich (z. B. Wien, Wulkatal) und Italien (z. B. Bozen).

2.3.3.2 e-Gem der Firma FlowChief

Die Software e-Gem der Firma FlowChief GmbH ist eine reine Webtechnologie, die in jede bestehende Infrastruktur integriert werden kann. Daher ist hierbei der Aufwand für Installation und Implementierung gering und die Flexibilität hoch (FlowChief, 2019).

2.3.3.2.1 Datenerfassung

Die Daten können entweder manuell (z. B. über die App) eingegeben oder direkt aus Zählerstandinformationen, Messwerte, Klimadaten, etc. über diverse Schnittstellen erfasst werden. Für die manuelle Dateneingabe ist eine Plausibilitätsprüfung integriert, um Fehler schnell vermeiden zu können (FlowChief, 2019).

2.3.3.2.2 Visualisierung und Monitoring

Mit der Software ist es möglich, die Daten in Form von Grafiken darzustellen. Hierbei kann man aus verschiedenen Diagrammen wählen (Fluss-, Sankey-, Strukturdiagramm). Außerdem lassen sich die Kurven mit Hilfe der Software analysieren. Im Speziellen sind hier Online-, Archiv- und Zeitvergleichsmodus, XY-Streudiagramm, Regressionsanalyse, Rechenfunktion und Kurvenkombination möglich. Außerdem lassen sich Minima und Maxima sowie Grenzwerte und Hüllkurven darstellen. Für die Diagramme sind einige Formatierungsvarianten, wie beispielsweise Farbe,

Zeitbereich, Auflösung und Diagrammtyp (Linie, Fläche, Säule, etc.), wählbar. Für die Visualisierung stehen Templates zur Verfügung, eine individuelle Einstellung ist ebenfalls möglich. Wie die Visualisierung der Software aussehen kann, ist in Abbildung 12 beispielhaft dargestellt (FlowChief, 2019).

Im Bereich des Monitorings beinhaltet die Software eine Leistungsüberwachung, die außerdem Prognosen ausgibt und Alarmierungen möglich macht. Bei der automatischen Datenerfassung stehen die Daten in Quasi-Echtzeit zur Verfügung und können direkt angezeigt werden (FlowChief, 2019).

2.3.3.2.3 Berichte

Die Software ist in der Lage adhoc-Berichte zu erstellen und nutzt dabei auch zur Veranschaulichung Tabellen-, Kuchen-, Heatmap- oder Sankey-Diagramme. Berichte können in Excel oder PDF exportiert werden (FlowChief, 2019).

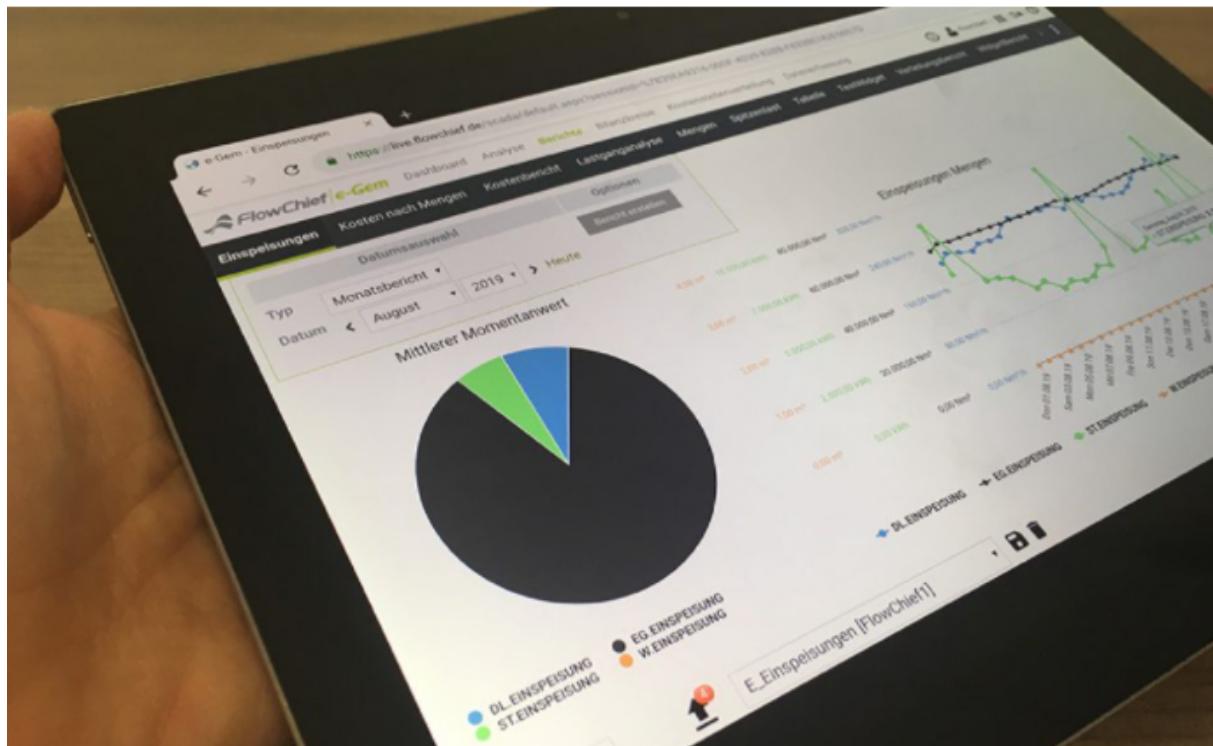
2.3.3.2.4 Dashboard

Um alle wichtigen Elemente auf einen Blick zu sehen, kann das Dashboard individuell angepasst werden. Eine Veranschaulichung über Charts ist hierbei ebenfalls möglich (FlowChief, 2019).

2.3.3.2.5 Anwendung im Bereich Wasserwirtschaft

Im Bereich der Wasserwirtschaft beinhaltet die Software die Analyse und Überwachung von Energiewerten. Die Werte werden in aussagekräftige Kennzahlen umgewandelt. Das System ermöglicht die Lastspitzenüberwachung und ist in der Lage, Bilanzierungsberichte zu erstellen. Bisher erfolgte die Anwendung vorwiegend in der Wasserversorgung, erste Anwendungen auf Kläranlagen sind in Arbeit (FlowChief, 2019).

Abbildung 12: Visualisierung mit e-Gem der Firma FlowChief



(Quelle: FlowChief, 2019)

2.3.3.3 Prozessleitsystem der Firma FlowChief

Das Prozessleitsystem der Fa. FlowChief GmbH erlaubt die Aufzeichnung und Aggregation von Prozessdaten. Integrieren lässt sich hierbei auch das im vorigen Kapitel beschriebene Energiedatenmanagementsystem e-Gem. Über das System können Berichte nach DWA und das Betriebsstagebuch erstellt werden. Außerdem ist die Visualisierung durch Vektorgrafiken möglich. Hierbei können Trends, Meldelisten, Maps und Ganglinien dargestellt werden. Das System beinhaltet zudem ein Wartungsmanagementsystem, welches das Einpflegen von Wartungsmaßnahmen, Reparaturen und Vorsorgemaßnahmen übernimmt sowie die Betriebsführung protokolliert (FlowChief, 2018).

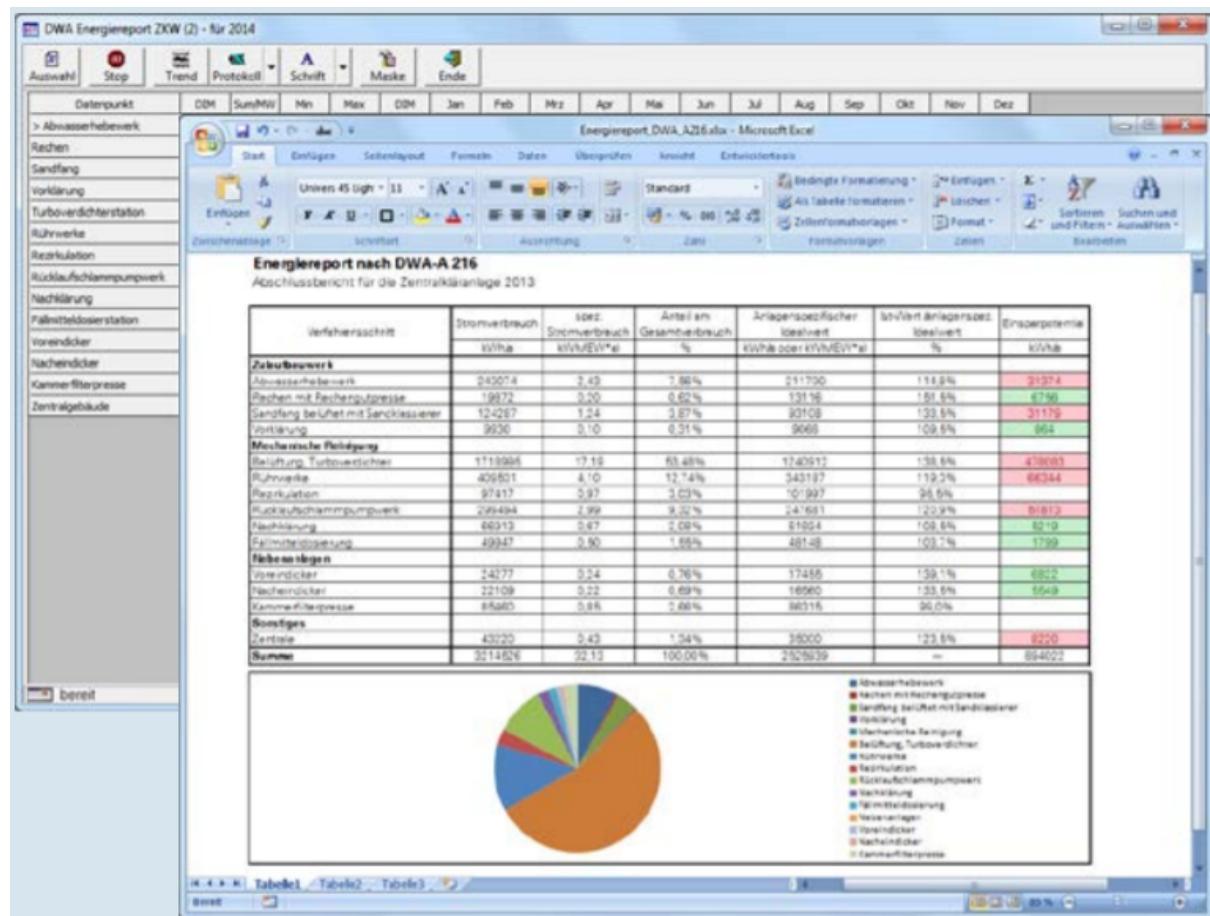
Das System ist durch seine Plattform- und Geräteunabhängigkeit von überall zu erreichen. Daten können auch offline manuell eingetragen werden. Die Prozessdaten werden sekundengenau aufgezeichnet und aggregiert, wodurch die Prozessinformationen in Echtzeit aufgezeigt und verarbeitet werden können (FlowChief, 2018).

Die Fernwirktechnik ist unter anderem koppelbar mit Systemen von Siemens, Beckhoff oder Phoenix Contact (FlowChief, 2018). Dies wird ermöglicht, indem bei der „geschlossenen Architektur“ von FlowChief dennoch auf die im Hintergrund liegende SQL-Datenbank (Open Source) zugegriffen werden kann, um mit weiteren Systemen Auswertungen vorzunehmen (Expertenbeirat, 2021).

2.3.3.4 Energiemanagementsoftware TIBS der Firma BN Automation AG

Die Energiemanagementsoftware TIBS von BN Automation AG dient dazu, Prozess-, Produktions- und Energie- oder Betriebsdaten zu erfassen, zu verarbeiten und zu visualisieren. TIBS unterstützt die branchenspezifischen Anforderungen der DWA und DVGW Arbeitsblätter mit Kennzahlen, Energiereports und grafischen Analysen und dient der kontinuierlichen Auswertung der energetischen Situation nach DWA-A 216. Die Software schafft eine Grundlage für die Erkennung von energetischen Einsparpotenzialen durch Berechnung von Kenngrößen. Eine vergleichende Auswertung zwischen Anlagen im Unternehmen oder innerhalb der Branche ist außerdem möglich (BN Automation AG, o.J.).

TIBS ist als modulares Produkt gestaltet und beinhaltet unter anderem Module zur Archivierung, Datenauswertung, Wartungsmanagement, Export und Import von Daten. Eine automatische Berichtserstellung ist in der Software verfügbar. Wie die Energieanalyse, -auswertung und -dokumentation mit der Software aussehen kann, lässt sich der Abbildung 13 entnehmen (BN Automation AG, o.J.).

Abbildung 13: Energieanalyse, -auswertung und -dokumentation nach DWA mit TIBS

(Quelle: BN Automation AG, o.J.)

Die Software TIBS ist unter anderem in den Kläranlagen in Karlsruhe oder des Wupperverbands installiert (BN Automation AG, o.J.).

2.3.3.5 Optimierungssoftware RITUNE der Firma Rittmeyer

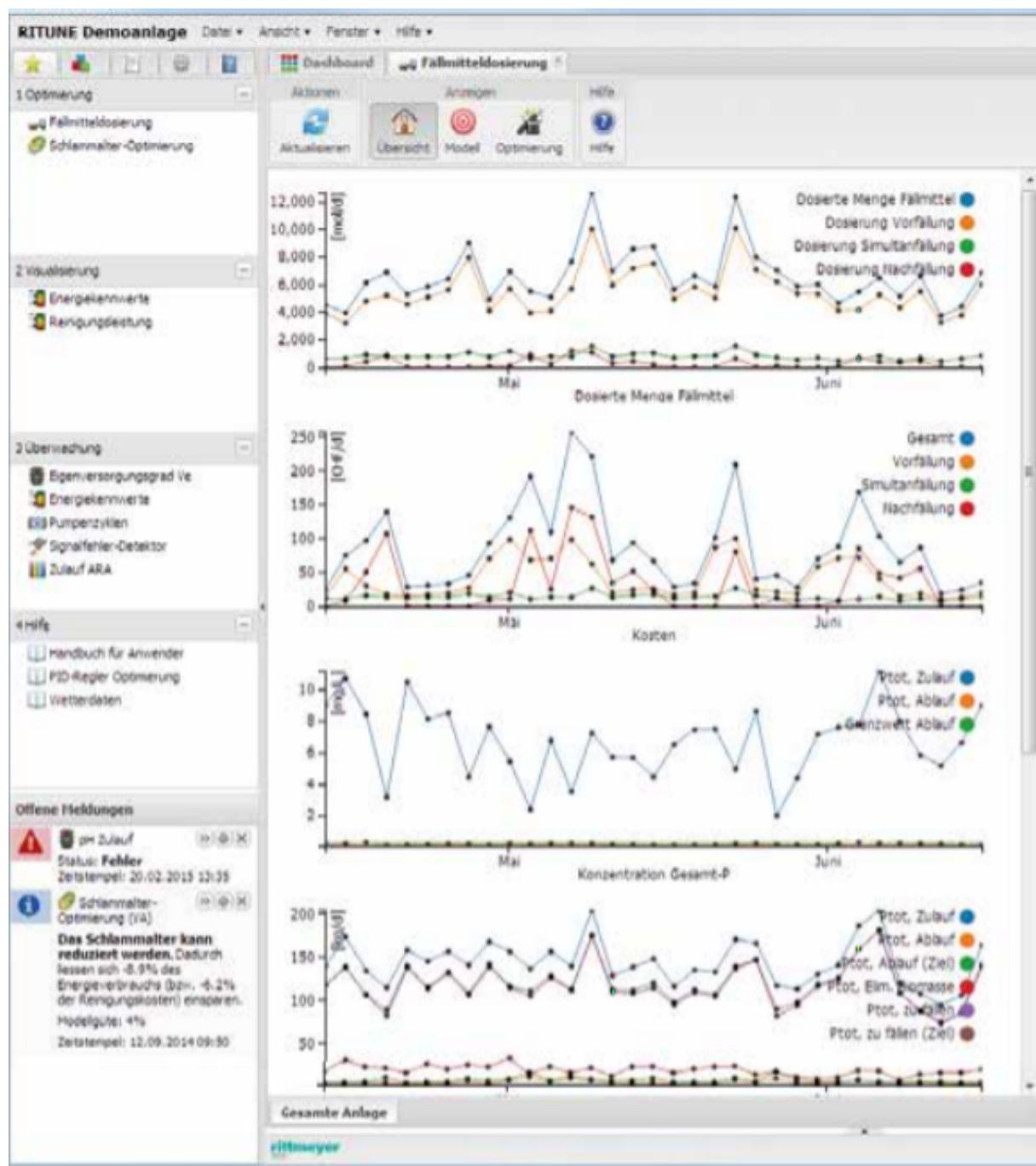
RITUNE ist eine prozessübergreifende Optimierungssoftware der Firma Rittmeyer. Sie ist in der Lage, laufend vorhandene Daten des Kläranlagenbetriebs zu analysieren und darauf basierend Optimierungspotenziale zu zeigen sowie Handlungsempfehlungen auszusprechen. Dabei greift die Software auf Daten zu, die intern vorhanden sind (Berichte, Wartungspläne, Protokolle, Leitsysteme), und ergänzt diese durch externe Daten. Das modulare System kann individuell auf die Anlage angepasst werden. Die entsprechenden Handlungsempfehlungen und Optimierungspotenziale werden abgeleitet aus aktuellen und historischen Messdaten. Zusätzlich lassen sich verschiedene Werte festlegen (Sauerstoffssollwerte, etc.), die zur Optimierung des Ressourceneinsatzes sowie der Ablaufqualität beitragen (Rittmeyer, o.J.).

Überwachungsmodule dienen der frühzeitigen Erkennung von Ausfällen, Verschleiß oder anderen unerwünschten Veränderungen. Die Abweichungen werden durch Vergleich mit vorigen Betriebsdaten erkannt und durch Analysen und Bilanzierungen auf Plausibilität überprüft (Rittmeyer, o.J.).

Im modularen System RITUNE gibt es außerdem Module, die der Steuerung und Visualisierung dienen. Diese zeigen Zusammenhänge auf und lassen eine anschauliche und übersichtliche Analyse von Daten zu. Damit lässt sich nicht nur der gesamte Prozessablauf visualisieren, sondern

auch die Relation zwischen Energieverbräuchen und Prozesswerten darstellen. Eine Darstellung der Visualisierung mit RITUNE zeigt Abbildung 14.

Abbildung 14: Visualisierung und Optimierung mit RITUNE



(Quelle: Rittmeyer, o.J.)

Zusätzlich zur Visualisierung ist es der Software möglich Kennzahlen zu vergleichen, die Wirksamkeit von Maßnahmen zu beurteilen sowie Prognosen abzuleiten. Die errechneten Ergebnisse können über die Software in das Prozessleitsystem der Anlage übertragen werden (Rittmeyer, o.J.).

Das System der Fa. Rittmeyer findet sich in verschiedenen Kläranlagen in Deutschland, Österreich und der Schweiz, z. B. Nürtingen, Emschermündung, Weilerbach (Rittmeyer, o.J.).

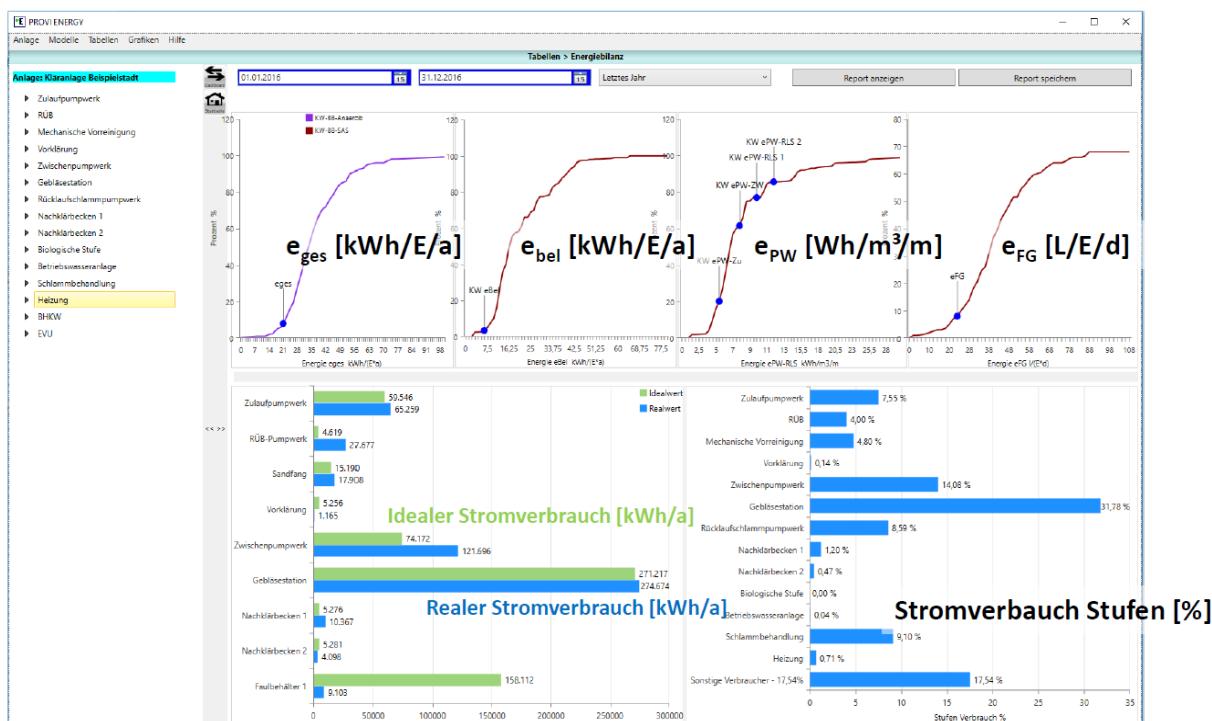
2.3.3.6 Software proload.data der Firma Hydrograv

Mit proload.data der Fa. Hydrograv ist es möglich, Daten zu verwalten und Analysen und Berichte zu erstellen. Das System kann vielfältig Daten importieren und Ausreißer sowie Fehlmessungen bereinigen. Je nach Anforderung können die Daten grafisch analysiert und dargestellt werden. Eine Auswertung der Daten sowie die Erstellung eines Berichts sind mit dem System möglich. Damit vereint das System die Datenverwaltung, Auswertung und Berichterstellung in einer Software (Hydrograv, 2017).

2.3.3.7 Software PROVI ENERGY der Firma BITControl GmbH

PROVI ENERGY ist eine Software für Energiemanagement und Monitoring, die auf dem Arbeitsblatt DWA-A 216 basiert und gezielt die dort geforderten Kennwerte, Ideal- und Realwerte, Potenziale und Berichte berechnet und in Form von Grafiken und Tabellen zur Verfügung stellt. Ein Beispiel der grafischen Darstellung der Ergebnisse mit der Software zeigt Abbildung 15.

Abbildung 15: Grafische Darstellung der Ergebnisse mit PROVI ENERGY



(Quelle: BITControl GmbH, 2021)

Mit PROVI ENERGY können Ergebnisse von Energieanalysen jederzeit für einen wählbaren Zeitraum generiert werden. Außerdem lassen sich Ergebnisse von Optimierungs- und Modernisierungsmaßnahmen nach Abschluss der Maßnahme schnell und einfach automatisch generieren und nachweisen. Im laufenden Betrieb werden über das System Handlungsempfehlungen ausgesprochen, sodass der effiziente Betriebszustand erhalten werden kann (BITControl GmbH, 2021).

PROVI ENERGY wird bereits in Pirmasens und Bitburg als Nachweisinstrument für das Energiemanagement eingesetzt. Ein besonderes Merkmal von PROVI ENERGY ist, dass die tatsächliche Belastung laufend automatisch berechnet werden kann. Die Kennwerte können automatisch aktualisiert werden und für wählbare Zeiträume dargestellt werden. Die Idealwertberechnung nach DWA-A 216, insbesondere die Berechnung des Sauerstoffbedarfs, ist im System implementiert (BITControl GmbH, 2021).

2.3.3.8 System AQASYS der Firma Schraml

Das AQASYS-System der Fa. Schraml vereint Visualisierung, Reporting, Trendlinien sowie Fernalarmierung. Das System ist ausgelegt für die Überwachung, Steuerung, Visualisierung und Fernwirkung. Es enthält viele Funktionen, die speziell für den Anwendungsbereich und Anforderungen der Wasser- und Abwasserwirtschaft ausgelegt sind (SCHRAML, 2018).

Mit AQASYS ist es möglich, Prozesse zu visualisieren und zu bedienen. Es enthält einen Störmelde manager und kann Berichte und Ganglinien erstellen. Speziell für die Branche der Abwasseranlagen dient das Modul der Energieoptimierung, das Leistungsspitzen erkennt und bestmöglich abfедert, den Wirkleistungsbezug durch Verbraucherabschaltung in Echtzeit regelt sowie eine Abschaltstrategie anhand definierter Prioritäten implementiert. Weitere Softwaremodule sind die Maximumüberwachung, Protokollierung, Alarmierung sowie die Erstellung des Betriebstagebuchs für Kläranlagen. Das Betriebstagebuch enthält Funktionen wie beispielweise die Berichterstattung, grafische Aufbereitung, Leistungsvergleiche oder Auswertungsprotokolle (SCHRAML, 2018). Das Dashboard mit möglichen grafischen Auswertungen des Systems zeigt Abbildung 16.

Abbildung 16: Dashboard AQASYS



(Quelle: SCHRAML, 2018)

Das System ist beispielsweise auf der Kläranlage Schwabach installiert, die die Funktion des Betriebstagebuchs nutzt und somit Monats-/Jahresberichte erstellen, Leistungen nach DWA vergleichen oder Leistungsbilder darstellen lassen kann. Die Auswertungen nach DWA können über Excel ausgegeben und verarbeitet werden (SCHRAML, 2018).

2.3.3.9 Vergleichende Übersicht der vorgestellten Softwaresysteme für Energieanalysen und Visualisierung

Die folgende Tabelle 5 fasst die Eigenschaften und Möglichkeiten der beschriebenen Softwaresysteme vergleichend zusammen.

Tabelle 5: Vergleich der für statische und dynamische Energiebetrachtungen genutzten Softwaresysteme

System/ Produkt	Hersteller	PLS Sys- tem	Daten				Berechnung und Funktionen							Visualisierung			
			Daten- einga- be manu- ell	Daten- einga- be Schnitt stelle	Web- Lö- sung	Da- ten- ex- port	Auf- zeich- nen/ Aggre- gieren Prozess- daten	Ener- gie- kenn- zah- len	Echt- zeit- über- wa- chung	Alar- mie- rung	Prog- no- sebe- rech- nun- gen	Be- richts- aus- gabe	Wartungs- ma- nage- ment	Be- triebs- tage- buch	Linien/ Bal- ken- Dia- gramm	Te- p- pich- dia- gramm	Vek- tor- gra- fiken
e-Gem	Flow Chief			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
PLS	Flow Chief	x					x					x	x				
TEVIS D	DEBIS																
RITUNE	Rittmeyer AG			x	x	x	x	x		x	x		x	x	x		
proload. data	Hydrograv			x		x	x					x					
PROVI- ENERGY	BITControl			x	x	x	x	x		x	x	x		x	x		
AQASYS	Schraml	x		x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		

(Quelle: Eigene Darstellung, FiW)

Zusätzlich zu den in der oben genannten Tabelle dargestellten „geschlossenen“ Systemen, existieren weitere Open-Source-Systeme, wie bspw. ACRON oder SQL, die beliebige Datenreihen visualisieren können. Für geschlossene Systeme besteht die Möglichkeit, auf Open-Source-Systeme zuzugreifen. Durch bestimmte Durchlässigkeiten und Verbindungspunkte ist ein Zugriff auf diese Inhalte möglich. Open-Source Systeme können jedoch nicht mit den o. g. Kriterien beurteilt werden und wurden deshalb im Rahmen dieses Projektes nicht weitergehend thematisiert.

2.3.4 Verfügbare „intelligente“ Aggregate ohne Bezug zu Energieanalysen nach DWA-A 216

Unabhängig von den Energiekennzahlen des Energiechecks nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216 gibt es bereits „intelligente“ Systeme, die in der Abwasserwirtschaft Anwendung finden. Intelligente Aggregate übernehmen immer häufiger einfache Regelungsaufgaben selbst. Solche Kompaktaggregate verfügen über intelligente Sensoren und Microcomputer, die gemessene Daten direkt verarbeiten/auswerten (Pinnekamp et al., 2017). Im Folgenden werden zwei Beispiele vorgestellt: zum einen die Pumpenstationssteuerung Flygt SmartRun der Firma Xylem, zum anderen das System Aqualogic der Firma Intech, durch das eine intelligente und angepasste Regelung der biologischen Stufe einer Kläranlage möglich ist.

Die hardwareseitige Optimierung von Laufrädern durch die Flygt SmartRunTM FU-Steuerung der Firma Xylem kann eingesetzt werden, um Verstopfungen von Pumpen zu vermeiden. Drucksensoren in der Pumpe selbst erkennen nicht reguläre Betriebszustände, die z. B. durch Verzopfungen hervorgerufen werden. Die in der Pumpe integrierten Mikrocontroller können dann einen kurzen Rückwärtlauf aktivieren, um das Laufrad von Verzopfungen/Verstopfungen zu befreien. Infolge dessen werden manuelle Einsätze zur Verstopfungsbehebung vermieden, dies führt zu einem energetisch optimierten Betrieb (Xylem, 2021) und senkt damit auch die Wartungs- und Betriebskosten.

Die Methoden der Fuzzy Logic und der Neuronale Netze dienen zur Lösung nicht linearer/nicht näher spezifizierter Probleme. Sie sind Bestandteile der künstlichen Intelligenz (eng. Artificial Intelligence), unterscheiden sich aber deutlich in ihrer Methodik. Neuronale Netze versuchen, den Denkprozess des menschlichen Gehirns nachzustellen, um Probleme zu lösen, ohne sie vorher mathematisch modellieren zu müssen. Im Gegensatz dazu ermöglicht die Fuzzy Logic die Entscheidungsfindung auf Basis ungenauer oder mehrdeutiger Daten. Sie ähnelt damit dem menschlichen Entscheidungsfindungsprozess. Hierfür müssen jedoch im Vorfeld Zugehörigkeitsfunktionen (eng. membership functions) und Regeln, welche diese untereinander verknüpfen, festgelegt werden.

Lernalgorithmen Neuronaler Netze benötigen hingegen große Mengen an Trainingsdaten (Prakruthi Gowd, B. et al., 2018). Ein Beispiel ist die intelligente Regelung der biologischen Stufe durch das System Aqualogic der Firma Intech. Es ermöglicht nach Herstellerangaben, die ideale Ansteuerung aller ausführenden Aggregate mit Hilfe von Fuzzy Logic. Dieses basiert auf dem Lernen durch Aufnahme und Auswertung sehr vieler Betriebssituationen. Infolge dessen ist eine permanente Berechnung und Überwachung der Belastungsverhältnisse für Gebläsestation, Pumpwerke, Schieber, etc. möglich (Aqseptence Group, 2017). Das System reagiert dabei selbstständig auf Belastungsschwankungen und Prozessbedingungen. Der bedarfsgerechte Sauerstoffeintrag in die biologische Stufe wird dabei über die Erfassung, Auswertung und Regelung der Parameter Sauerstoff, Ammonium, Nitrat, Temperatur, etc. gesteuert. Über einen integrierten Zehrungsregler wird zusätzlich die organische Belastung ermittelt, um so einen optimalen Kohlenstoffabbau zu ermöglichen. Zusätzlich können eigene Erfahrungswerte und Anpassungswünsche der Anwender berücksichtigt werden. So ist die Sauerstoffeintragsregelung mit weiteren

Regelungsmodulen erweiterbar, je nach anlagenspezifischen Erfordernissen. Die Nutzung von Fuzzy Logic ermöglicht somit eine flexible Anpassung an geänderte Bedürfnisse ohne zusätzlichen Programmieraufwand (Aqsetence Group, 2017).

Für kleine Anlagen ist auch eine einfache Regelungsvariante auf Basis von Sauerstoff, Redoxpotenzial und Temperatur möglich (Aqsetence Group, 2017).

2.3.5 Identifizierung geeigneter Parameter zur dynamischen Energieanalyse

2.3.5.1 Vorschläge von Parametern für verschiedene Aggregate/Verfahrensschritte sowie Betrachtungszeiträume

Für die Entwicklung weiterer Kennzahlen stehen die Wege

- a) Modifizierung bzw. Weiterentwicklung der Bezugszeiträume für bestehende Kennzahlen des DWA-A 216 und
- b) Neuentwicklung anhand bisher nicht genutzter Parameter zur Verfügung.

Für die über das DWA-A 216 hinausgehenden Kennzahlen wurden neue Zusammenhänge gesucht unter Verwendung weiterer Parameter/Messwerte. Diese werden im Zusammenhang mit den damit gebildeten Kennzahlen erläutert.

Andere Betrachtungs- oder Bezugszeiträume erfordern ggf. andere Einheiten oder die Wahl alternativer physikalischer oder technischer Parameter z. B. Leistung statt (Jahres-)Arbeit.

Ausgehend von den bisherigen Kennzahlen nach DWA-A 216 wurden diese zunächst so weiterentwickelt, dass weitaus kürzere Bezugszeiträume gewählt wurden (s. folgende Tabelle 6).

Die Nummer in der ersten Spalte stellt den Bezug zur ursprünglichen Kennzahl nach DW-A 216 her. Die für die kürzeren Bezugszeiträume ermittelten Kennzahlen können zur Vergleichbarkeit mit den bekannten Kennzahlen nach DWA-A 216 auf ein Jahr (KWh/(E·a)) normiert werden.

Tabelle 6: Kennzahlen nach A 216 mit modifizierten (verkürzten) Bezugszeiträumen (t_x)

Bezug Kenn- zahl DWA-A 216	Bezeichnung	Kurz- zei- chen	Formel	Einheit	Bemerkung
1	spezif. Gesamtenergiebedarf bezogen auf t_x	$e_{ges,tx}$	$e_{ges,tx} = E_{ges,tx}/EW_{CSB,tx}$	[kWh/(EW·d)] [kWh/(EW·d)]	Bezug auf verschiedene Zeiträume (Monat, Tag), jedoch Normierung auf kWh/(E·a)
2	spezif. Belüftungsenergiebedarf Belebungsstufe bezogen auf t_x	$e_{Bel,tx}$	$e_{Bel,tx} = E_{bel,tx}/EW_{CSB,tx}$	[kWh/(EW·d)]	Bezug auf Tagesbedarf, jedoch Normierung auf kWh/(E·a)
4	spezif. Faulgasproduktion bezogen auf 1 Tag	Y_{FG}	$Y_{FG} = Q_{FG,d,aM}/Bd,oTM$	[l/(kg oTR·d)]	Bezug auf Tagesbedarf [l/kg oTR·d]
6	Eigenversorgungsgrad (Momentanwert) kontinuierliche Erfassung bzw. Tageswerte	$EV_{El,tx}$	$EV_{El,tx} = (E_{KWK,el,tx}/E_{ges}) \cdot 100$	[%]	kontinuierliche Erfassung, Tageswerte; Bezugszeit variabel, da Darstellung in [%]
8	spez. Stromverbrauch Pumpwerk	$e_{PW,tx}$	$e_{PW,tx} = E_{PW,tx} \cdot 1000 / (Q_{PW} \cdot h_{man})$	[kW/(m³·m)]	Bezug e_{PW} auf Tages- oder Stundenbedarf, ggf. Momentanwert

Mit Anpassungen der Bezugszeiträume der vorhandenen Kennzahlen nach DWA-A 216 werden folgende Aussagen erwartet:

- Der spez. Gesamtenergiebedarf $e_{ges,tx}$ ermittelt über einen Tag gibt einen Wert, der ggf. viel stärker Muster erkennen lässt oder auf spezielle Einzelereignisse hindeutet. Dies veranschaulichen besonders die Auswertungen mittels der Teppichdiagramme der Systeme PRO-VIENERGY und RITUNE.
- Analog kann dies auch für den spezifischen Energiebedarf zur Belüftung e_{Bel} zutreffen.
- Noch keine sinnvolle Modifikation für e_{FG} identifiziert.
- Spezifische Faulgasproduktion Y_{FG} bezogen auf kürzeren Zeitraum gibt ggf. Informationen zu Betriebsproblemen/Hemmungen Biogasproduktion im Faulbehälter.
- Noch keine sinnvolle Modifikation für N_{FG} identifiziert.
- Eigenversorgungsgrad $EV_{El,tx}$ ist als Momentan-, Stunden- oder Tageswert möglich. Dann kann dieser eine kurzfristigere Rückmeldung geben und ggf. für Steuerungsaufgaben z. B. für BHKW/Gasspeicher genutzt werden.
- Noch keine sinnvolle Modifikation $e_{th,ext}$ bzgl. Bezugszeit identifiziert.
- Speziell verspricht auch der spezifische Stromverbrauch von Pumpwerken $e_{PW,tx}$ bezogen auf einen Stundenwert oder Momentanwert genauere und tiefgründigere Aussagen zur Effizienz einer Hebestufe. Hier ist noch zu identifizieren, welche Aussagen im kontinuierlichen Betrieb bzw. bei kontinuierlicher Auswertung dieser Kennzahl möglich sind. Erwartet werden ge-

nauere Aussagen zum Teillastverhalten, zum Gesamtwirkungsgrad bei Teillast sowie frühzeitige Aussagen über Verschleiß und/oder Verzopfungen bei Kreiselpumpen. Dies könnte durch Trends bzw. auch Mustererkennung frühzeitig sichtbar gemacht werden. Die Definition von „Normalbereichen“ gibt die Möglichkeit, Abweichungen früh zu erkennen und ggf. mit Alarminformationen sichtbarer zu machen.

Weiterhin wurde die Kennzahl $e_{Bel,tx}$ durch Modifizierung der Bezugsgröße modifiziert.

Die Kennzahl spezif. Strombedarf für die Belüftung (der Belebung) ist aus e_{Bel} abgeleitet worden bezieht sich auf die Gebläseleistung und nicht die elektrische (Jahres-)Arbeit.

Die Kennzahl Wärmebedarf bezogen auf beheizte Gebäudefläche wurde jedoch als neue Wärmezahl eingesortiert (s. Tabelle 7).

Tabelle 7: Kennzahlen nach DWA-A 216 mit modifizierten Bezugsgrößen

Bezug Kennzahl DWA-A 216	Bezeichnung	Kurz- zeichen	Formel	Einheit	Bemerkungen
2	spezif. Stromverbrauch Belüftung Belebung (Kurzzeitwert)	$e_{Bel,tx}$	$e_{Bel,tx} = E_{bel,tx}/B_{d,EW}$	[kWh/E*d], [kWh/E*a]	Tageswert, Bezug auf Einwohner, Normierung auf Jahreswert
2	spezif. Stromverbrauch Verdichter	e_{ver}	$e_{ver} = E_{Verdichter}/(Q_L \cdot p)$	[Wh/(m³·a)]	Bezug auf Luft- menge und Druck
6	Eigenversorgungsgrad EV_p (Momentanwert P)	$EV_{P,tx}$	$EV_{P,tx} = (P_{eigen,el}/P_{ges}) \cdot 100$	[%]	Bezug auf Mo- mentanleistung

Mit Anpassungen der Bezugsgrößen der vorhandenen Kennzahlen nach DWA-A 216 werden bei der Kennzahl 2 in zwei ähnlichen Kennzahlen folgende Aussagen erwartet:

1. Aus der Weiterentwicklung der Kennzahl e_{Bel} nach DWA-A216 e_{Bel} zum spezif. Stromverbrauch Belüftung als $e_{Bel,tx}$ werden Informationen zum Kurzzeitverhalten erwartet, Bezug ist hier die CSB-Fracht (EW)
2. Bei der Kennzahl spezif. Stromverbrauch Verdichter werden Aussagen zur notwendigen spezifischen Leistung normiert auf das Produkt von Luftmengen und Druck über eine große Anzahl von Betriebszuständen erwartet (Seibert-Erling, mündl. Mitteilung).

Mit Anpassungen der Bezugsgrößen der vorhandenen Kennzahl EV_{el} nach DWA-A 216 werden bei der Kennzahl $EV_{el,tx}$ folgende Aussagen erwartet:

Der leistungsbezogene Eigenversorgungsgrad EV_p ist eine interessante Kennzahl, die ebenfalls für ein Management der Eigenenergieerzeugung bzw. für das Lastabwurfmanagement zur Vermeidung von Strombezugsspitzen genutzt werden kann. Dies wird in verschiedenen Softwaresystemen bereits realisiert bzw. kann mit diesen technisch umgesetzt werden (AQASYS, RITUNE, PROVENERGY, e-Gem). Dies betrifft insbesondere den Eigenversorgungsgrad als leistungsbezogenen Wert EV_p .

2.3.5.2 Vorschläge von neuen Kennzahlen

Anknüpfend an den Kennwert e_{PW} nach DWA-A 216 wurden weitere Kennwerte aus einer sogenannten Abweichungsanalyse abgeleitet und teilweise neu entwickelt. Diese könnten wertvolle Informationen insbesondere zu schlechenden Prozessen liefern. Es wird für die Abweichungsanalyse ein Kennwert zum Zeitpunkt 0 gebildet (im Folgenden als t_0 bezeichnet). Dann wird dieser Kennwert für einen definierten Zeitraum immer wieder neu berechnet und mit dem Wert zum Zeitpunkt t_0 verglichen. Das Ergebnis ist die prozentuale Abweichung des Kennwertes vom Wert zum Zeitpunkt t_0 (vgl. Tabelle 8).

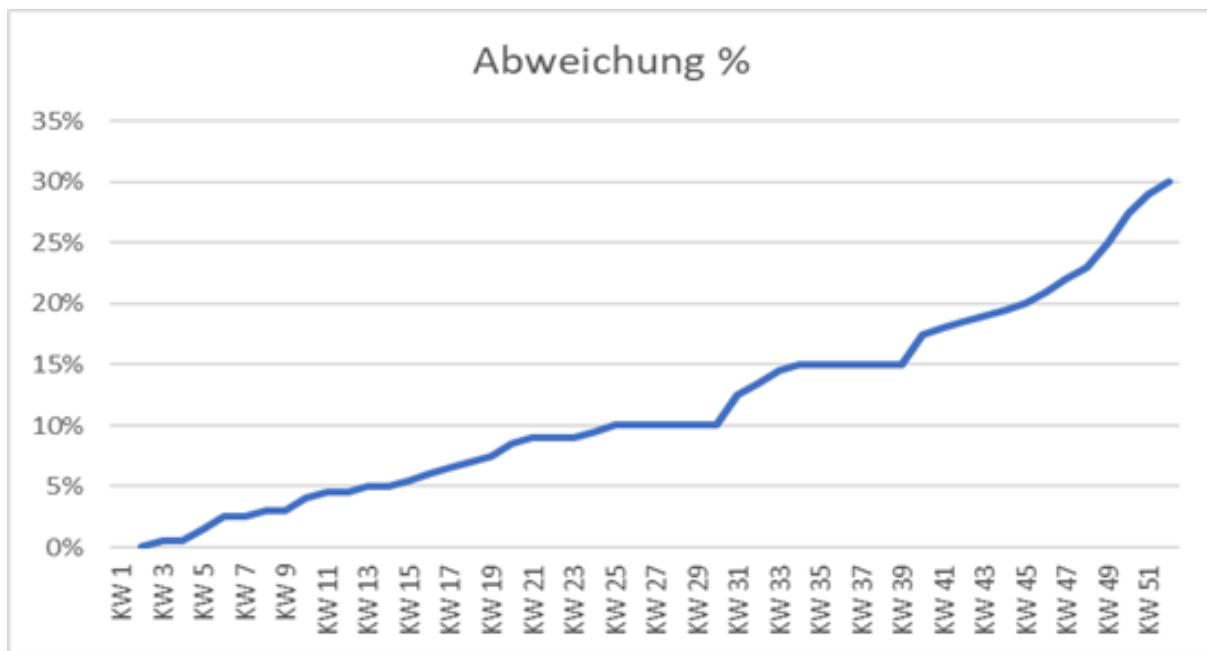
Am Beispiel des Kennwerts Δe_{PW} [$\text{Wh}/\text{m}^3 \cdot \text{m}$] wird im Folgenden die Abweichungsanalyse erläutert. Der Kennwert Δe_{PW} für ein beliebiges Pumpwerk ist nicht mit Kennwerten anderer Pumpwerke vergleichbar. Für ein bestimmtes Pumpwerk nimmt dieser jedoch einen charakteristischen Wert ein, der sich über die Betriebszeit verändern wird. Dieser Wert kann nun z. B. nach Einbau einer neuen Pumpe als Wert zum Zeitpunkt t_0 definiert werden und markiert damit den Ausgangspunkt der Betrachtung bzw. Aufzeichnung. Die Abbildung 17 zeigt die grafische Darstellung einer erwarteten noch hypothetischen Abweichungsanalyse ausgehend vom Wert zum Zeitpunkt t_0 in Kalenderwoche (KW) 1.

Tabelle 8: Kennzahlen zur Beschreibung Abweichungsanalyse

Bezug zu Kennzahl DWA-A 216	Bezeichnung	Kurzzeichen	Formel	Einheit	Bemerkungen
8	Abweichung spez. Stromverbrauch Pumpwerk von Startwert $f(t_0)$	Δe_{PW}	$\Delta e_{PW} = ((P_{PW,tx} - P_{PW,t0}) / P_{PW,t0})$	[%]	
2	Abweichung spez. Stromverbrauch Belüftung von Startwert $f(t_0)$	Δe_{Bel}	$\Delta e_{Bel} = (P_{Bel,tx} - P_{Bel,t0}) / P_{Bel,t0}$	[%]	Entwicklung noch nicht abgeschlossen
	Relatives Schlammalter	Δt_{TS}	$\Delta t_{TS} = t_{TS,IST} / t_{TS,soll}$	[%]	

Hierbei muss beachtet werden, dass eine solche Kennzahl bei drehzahlgeregelten Pumpen schwierig und ggf. nicht sinnvoll ist. Alternativ zu der o. g. Abweichungsanalyse kann ein charakteristischer Betriebspunkt festgelegt und verglichen werden, um das Verhalten über Zeit zu beobachten. Wird die Frequenz, mit der die Pumpe läuft, erfasst und die Abweichung der (hinterlegten) Ganglinie berechnet, führt diese zu einem genaueren Kennwert als eine Abweichung von $t = 0$ (Expertenbegleitkreis, 2021).

Weitere Anwendungsbeispiele für die Abweichungsanalyse ergeben sich für die Belüftung Δe_{Bel} [$\text{kWh}/(\text{E} \cdot \text{a})$] und das relative Schlammalter Δt_{TS} . Für Δe_{Bel} wurde erwartet, dass sich über einen sinnvoll gewählten Betrachtungszeitraum eine Information über Veränderungen, zumeist Verschlechterungen der Belüftungseffizienz ergeben. Allerdings spielen in diese Kennzahl noch mehrere Faktoren hinein wie z. B. die Abwassertemperatur oder die zu verarbeitenden Frachten. Die Kennzahl des relativen Schlammalters Δt_{TS} soll dazu dienen, einen für den Anlagenbetrieb optimalen Bereich des Schlammalters einzuhalten, d. h. zu geringe Schlammalter (Risiko für Instabilität der Nitrifikation) und zu hohe Schlammalter (unnötig hoher Sauerstoffbedarf) zu vermeiden.

Abbildung 17: Abweichungsanalyse für e_{PW} (schematische idealisierte Darstellung)

(Quelle: Eigene Darstellung, BitControl GmbH)

Zusätzlich wurden für den Bereich Wärme eine ganze Reihe neuer über die DWA-A 216 hinausgehender Kennzahlen als Diskussionsgrundlage entwickelt, die in der folgenden Tabelle 9 zusammengefasst sind.

Tabelle 9: Ansätze für neue Kennzahlen im Bereich Wärme

Kennzahl	Bezeichnung	Kurzzeichen	Formel	Einheit	Bemerkungen
10	spez. Gesamtwärmebedarf	$e_{therm,ges}$	$e_{therm,ges} = E_{therm}/EW_{CSB,a}$	[kWh/EW·a]	Idee KA AG 7.4 (Wärme-Kälte-Konzepte)
11	spez. Gesamtwärmebedarf Gebäude	$e_{therm,Gebäude}$	$e_{therm,Gebäude} = E_{therm,Gebäude}/EW_{CSB,a}$	[kWh/EW·a]	Idee KA AG 7.4
12	spez. Gesamtwärmebedarf Schlamm	$e_{therm,Schlamm}$	$e_{therm,Schlamm} = E_{therm,RS-Erwärm+FB}/EW_{CSB,a}$	[kWh/EW·a]	Idee KA AG 7.4
13	spez. Gesamtwärmebedarf Trocknung	$e_{therm,Trocknung}$	$e_{therm,Trocknung} = E_{therm,Trocknung}/EW_{CSB,a}$	[kWh/EW·a]	Idee KA AG 7.4
14	Eigenversorgungsgrad Wärme	$EV_{Wärme}$	$EV_{Wärme} = E_{Wärme}/(E_{Wärme \text{ eigen}} + E_{Wärme \text{ fremd}})$	[%]	Idee KA AG 7.4
15	Externer therm. Energiebezug	$e_{th,ext}$	$e_{th,ext} = E_{th,ext}/EW_{CSB,Mo}$	[kWh/EW·a]	Extern. Energiebezug für therm. Zwecke, auch Strom+Heizung

Kennzahl	Bezeichnung	Kurzzeichen	Formel	Einheit	Bemerkungen
16	spez. Wärme Gebäudefläche	$e_{th,AG}$	$e_{th,AG} = E_{th,Geb}/AG$	[kWh/m ² *a]	Wärmebedarf bez. auf Gebäudefläche [kWh _{term} /m ²]
17	spez. Wärme Faulung	$e_{th,FB}$	$e_{th,FB} = E_{th,FB}/V_{FB}$	[kWh/m ³]	Aufheizung und Verlustausgleich bez. auf [m ³] FB Volumen
18	spez. Wärme Schlammaufheizung	$e_{th,RS}$	$e_{th,FB} = E_{th,FB}/Q_{RS,FB}$	[kWh/m ³]	Wärmemenge zum FB (RS-Aufheizung+ Verlustausgleich) bez. auf zugef. [m ³] Rohschlamm-Vol.
19	Wärmeabgabe Notkühler	$e_{th,Notkühler}$	$e_{th,Notkühler} = E_{th,Notkühler}/E_{therm,BHKW}$	[%]	eigene Idee BITControl + FiW + Flowchief + KA Kitzingen
20	spez. Wärme Notkühler, Bezug auf Biogaseinsatz	$e_{th,Notkühler, Biog}$	$e_{th,Notkühler, Biog} = E_{th,Notkühler}/E_{Biogas}$	[% von E Biogas]	eigene Idee BITControl + FiW + SETACON

Die Kennzahl Nummer 10 beschreibt den spezifischen Gesamtwärmebedarf. Die Kennzahlen unter Nr. 11 bis 13 beschreiben die spezifischen Wärmebedarfe der wichtigsten Wärmeverbraucher wie Gebäude, Faulung, Schlammerwärmung und Schlammtrocknung zunächst bezogen auf den Einwohner. Damit soll eine Differenzierung der Kennzahlen des Wärmebedarfes einer KA möglich werden. Zunächst sind diese Kennzahlen für die Jahresmittelwertbetrachtung angelegt.

Analog zum Eigenversorgungsgrad beim Strom wird mit Kennzahl Nummer 14 ein Eigenversorgungsgrad Wärme $EV_{Wärme}$ definiert. Dieser erhält seine Bedeutung insbesondere mit Blick auf die in zunehmendem Maße installierten Trocknungsanlagen, ist aber auch für Anlagen ohne Faulgasgewinnung und Nutzung zunehmend relevant, da diese ihren Wärmebedarf zumeist über externen Öl-/Gasbezug, Fernwärme bzw. elektrische Heizungen oder Wärmepumpe decken. Dieser Eigenversorgungsgrad Wärme wäre analog zum leistungsbezogenen Eigenversorgungsgrad beim Strom auch für Steuerungszwecke bzw. das Energiemanagement insgesamt oder das Wärmemanagement geeignet.

Die Kennzahl $e_{th,ext}$ ist der externe thermische Wärmebezug analog zur Kennzahl aus dem DWA-A 216 und bezieht hier jedoch auch den Stromeinsatz für den Wärmebedarf (z. B. Gebäude) bei Anlagen ohne Faulung mit ein und erfasst nicht nur wie bisher den Zukauf oder Einsatz von Brennstoffen. Eine Momentanleistungsbetrachtung (Stundenleistung) wäre zu prüfen.

Die Kennzahl 16 $e_{th,AG}$ beschreibt den Wärmebedarf bezogen auf die Gebäudefläche. Dafür kann es sinnvoll sein, diese Kennzahl bezogen nur auf die beheizte Gebäudefläche zu formulieren analog der Kennwerte für Wohn- und Bürogebäude, da auf Kläranlagen zumeist auch ungeheizte Gebäude (z. B. Garagen) vorhanden sind.

Die Kennzahl 17 $e_{th,FB}$ kennzeichnet den Wärmebedarf für die Schlammaufheizung und den Ausgleich der Wärmeverluste bezogen auf das Faulraumvolumen. Darüber sollen Rückschlüsse über die Effizienz der Schlammerwärmung und ggf. entstanden Probleme z. B. durch Anbackungen und Verkrustungen identifiziert werden können. Für diese Kennzahl wird ein zeitlich recht trüges Verhalten erwartet. Dennoch sollte eine Überprüfung oder ein Bezug z. B. im Zeitintervall von einigen Wochen erfolgen. Die Sichtbarmachung wäre dann über Trends zu leisten.

Die Kennzahl 18 $e_{th,RS}$ spez. Wärme Rohschlammaufheizung kennzeichnet den Wärmebedarf für die Rohschlammaufheizung. Darüber sollen analog zur Kennzahl 17 $e_{th,FB}$ Rückschlüsse über die Effizienz der Schlammerwärmung und ggf. entstanden Probleme z. B. durch Anbackungen und Verkrustungen identifiziert werden können. Für diese Kennzahl wird ein zeitlich recht trüges Verhalten erwartet. Die Sichtbarmachung wäre ggf. über Trends zu leisten.

Mit Blick auf das Energiemanagement ist die Wärme wichtig, die über den Notkühler der BHKW abgegeben wird (Kennzahlen Nummer 19 und 20) ($e_{th,Notkühler}$). Die Abwärmebetrachtung über Notkühler ist einmal bezogen auf die gesamte dem BHKW zugeführte Biogasenergie und einmal auf die am BHKW thermisch bereitgestellte Wärme möglich. Die über Notkühler abgegebene Wärme stellt ein ungenutztes bzw. auch oft noch nicht nutzbares Potenzial dar.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Auflistung von notwendigen und häufig fehlenden Messdaten auf Kläranlagen

Um notwendige oder fehlende Messdaten auf Kläranlagen bestimmen zu können, ist zwischen den elektrischen Werten (Strom, Spannung, Leistung, elektrische Arbeit, ggf. $\cos \phi$) und sonstigen physikalisch-chemischen Messungen (Temperatur, Wärmemengen, Druck, Füllstand, Abwasser- und Schlammparameeter) zu unterscheiden.

Auf den meisten Kläranlagen fehlen Unterzähler für die elektrische Arbeit an den wichtigen Aggregaten wie Pumpen, Gebläse, großen Mischern oder Rührwerken sowie Schlammentwässerungsmaschinen.

Hier wäre der Vorschlag, bei Neuanschaffungen oder dem Ersatz größerer oder wichtiger Aggregate die elektrischen Kenngrößen automatisch durch zusätzlich eingebaute Zähler erfassen zu lassen und auszuwerten. Diese sind sehr häufig bereits in den Frequenzumformern (FU) integriert, so dass von den FU die Stromaufnahme nur noch kontinuierlich ausgelesen werden muss.

Oft fehlen auch Wärmemengenzähler an den wichtigen bzw. größten Verbrauchern. Werden Volumenströme bereits erfasst, sind durch einfach zu installierende Temperaturmessungen die Wärmemengen rechnerisch über Temperaturdifferenzen und Volumenströme ermittelbar.

Zur Bestimmung der Referenzgrößen werden oft die physikalischen Größen wie Volumenströme und Drücke nicht erfasst. Gerade an Pumpwerken mit mehreren Aggregaten sind zusätzliche MID bisher (aus Kostengründen) die Ausnahme. Hier wäre es sinnvoll, zumindest die Drücke auf Saug- und Druckseite der Pumpen kontinuierlich zu erfassen, automatisiert auszuwerten und zu verarbeiten. Um realistische Werte ermitteln zu können, sind jedoch auch die Wasserstände auf der Saugseite bzw. im Unterwasser (z. B. Schneckenpumpen) kontinuierlich aufzunehmen. Bei Pumpwerken mit Kreisel-, Drehkolben- und Exzenterschnecken existieren vielfach Füllstandsmessungen auf der Saugseite (mindestens als Trockenlaufschutz).

Im Anhang in Tabelle 12 bis Tabelle 17 werden notwendige und fehlende Messungen der physikalischen Parameter zur Ermittlung der Kennzahlen aufgelistet.

3.2 Anforderungen an die Qualität der Messdaten zur Plausibilitätsprüfung

Seitens des Expertenkreises wurde die Bedeutung der Qualität der Messdaten hervorgehoben. Diese sollte bei den Kennzahlen zur Dynamisierung berücksichtigt werden. Je nachdem, welche Quantität und Qualität an Daten vorliegt, können verschiedene Kennzahlen nicht adäquat abgebildet werden. Zu diesem Zweck wurden in diesem Kapitel Mindestanforderungen für die Eingangsdaten der (weiter-)entwickelten Kennzahlen zusammengefasst. Im Anhang in Tabelle 12 bis Tabelle 17 wurden alle Erkenntnisse zusammengetragen.

Aus diesen Tabellen wurden zu den folgenden Punkten Empfehlungen in Kapitel 4 erstellt:

- ▶ Art der notwendigen Daten, um **gesicherte Aussagen** treffen zu können
- ▶ (Mindest-) Anzahl an notwendigen Messwerten
- ▶ Häufigkeit der Kalibrierung/Überwachung der Messsysteme zur Qualitätssicherung der Messungen

3.3 Überprüfung modifizierter und neuer Kennzahlen in Praxisanlagen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des AP 3 zusammengefasst und grafisch aufbereitet. Für die Überprüfung der in DWA-A 216 vorhandenen und neu- oder weiterentwickelten Kennzahlen in AP 1 sowie der Ansätze zur kontinuierlichen Erfassung und Auswertung sowie weiterer Elemente einer kontinuierlichen Energieanalyse wurden in diesem Projekt insgesamt vier Kläranlagen gewonnen: die KA Asselbrunn, die KA Kitzingen und die KA Köln-Weiden sowie die KA Eilendorf. Weitere Informationen zu Pumpenkennzahlen konnten von der KA Aachen Eilendorf gewonnen werden.

Auf der KA Asselbrunn ist das System PROVENERGY der Firma BITControl GmbH installiert. Auf der KA Kitzingen wurde das System e-Gem auf das vorhandene Prozessleitsystem der Fa. Flow-Chief verwendet.

Einige der in Kapitel 2.3.5 vorgestellten neu entwickelten und angepassten Kennwerte wurden bereits von den Betreibern der KA Asselbrunn und Kitzingen in deren PLS integriert. Ebenso wurden dazu notwendige Messungen und Messstellenpunkte definiert.

Des Weiteren fand ein Treffen mit dem Betriebspersonal der Kläranlage Köln-Weiden statt. Durch den offenen Austausch mit dem Betriebspersonal konnte ein Einblick in den Bedarf der Kennzahlen und Visualisierungsmöglichkeiten gewonnen werden. Hierbei ist hervorzuheben, dass der Bedarf an Kennzahlen und einer möglichst aussagekräftigen Visualisierung je nach Kläranlage unterschiedlich ist. Das Betriebspersonal der KA Köln-Weiden hatte bereits selbst mit dem dort vorhandenen PLS-System eine Erfassung verschiedener Größen sowie einer Visualisierung ausprobiert und ihr Interesse an der Mitwirkung in diesem Projekt geäußert.

Auf der KA Eilendorf wurden bereits unabhängig von den Überlegungen in diesem Projekt Kennzahlen für die Pumpwerke entwickelt bzw. eine eingängige Visualisierung des e_{PW} als Momentanwert realisiert.

Das Betriebspersonal der KA Asselbrunn nutzte Visualisierungen aus dem System PROVI-Energy und ausgewählte Kennzahlen bereits seit einiger Zeit. Weitere Kennzahlen und Auswertungen konnten ermittelt werden, Priorität haben auf der KA Asselbrunn jedoch eher unmittelbar betriebliche Aufgaben.

Auf der KA Kitzingen, die bereits in einem energetisch sehr guten Zustand betrieben wurde, wurden im Laufe des Jahres 2021 verschiedene Kennzahlen bzw. zahlreiche online verfügbare energetische Daten im PLS integriert und sichtbar gemacht. Das Betriebspersonal war intensiv in den Prozess eingebunden und äußerte Interesse an weiteren Optimierungen.

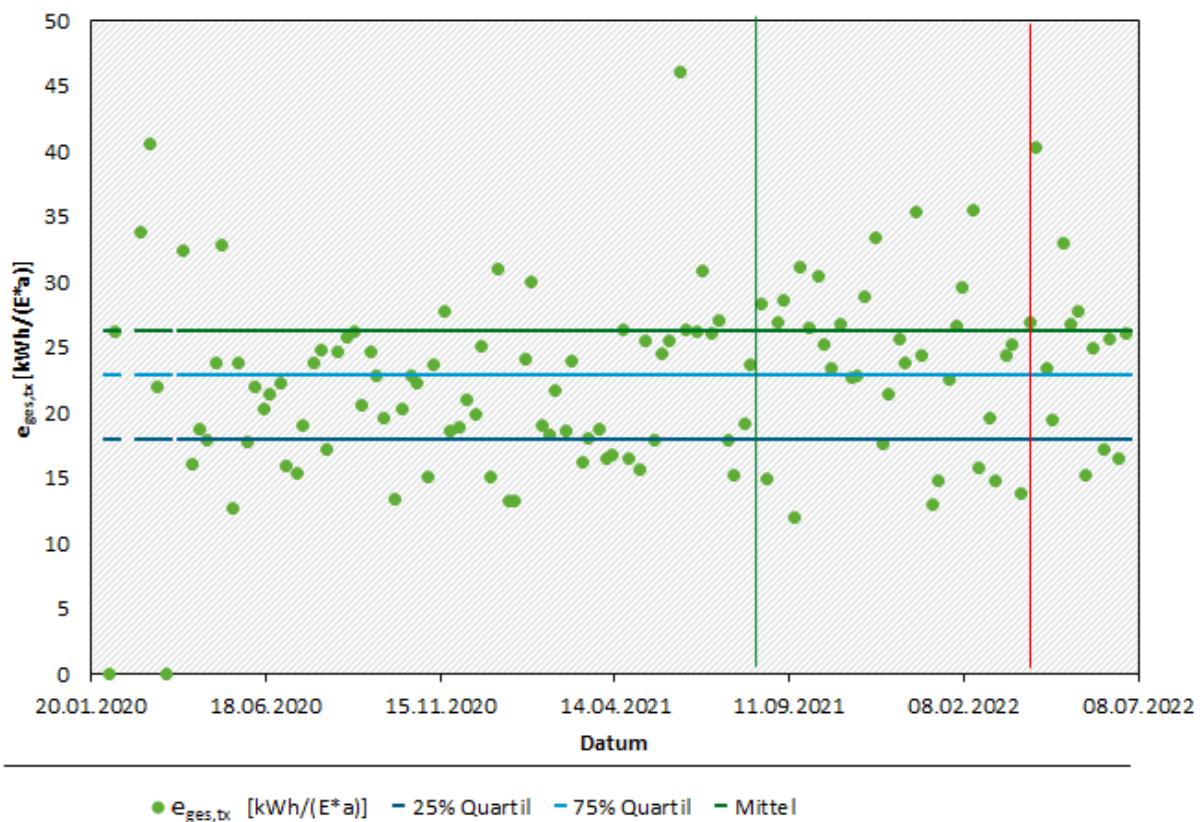
Die im Folgenden vorgestellten Kennzahlen wurden hinsichtlich ihrer Sinnhaftigkeit eingestuft. Diese Einschätzung wurde basierend auf Gesprächen mit verschiedenen Kläranlagenbetreibern vorgenommen und bildet eine eher subjektive Einschätzung ab, welche nicht direkt quantifizierbar ist. Die Einteilung in „sinnvoll“ und „nützlich“ wurde anhand von in Beispielen belegbaren Effekten bzw. Einsparpotenzialen ermittelt. Es wurden jedoch keine systematisch und ggf. übergreifend über mehrere Kennzahlen quantifizierbaren Kriterien identifiziert. Zur Überprüfung bzw. Bestätigung der Eignung ist ggf. eine größere Datendichte notwendig und es sollten mehr Kläranlagen einbezogen werden. Die Erweiterung der bislang vorliegenden Datenlage ist zudem für die Ermittlung der statistischen Signifikanz der Kennzahlen sinnvoll. Jedoch ist nicht auszuschließen, dass die Randbedingungen auf den Kläranlagen durchaus so verschieden sein können, dass die Eignung einer ausgewählten Kennzahl auf einer Anlage bestätigt werden kann und auf einer anderen jedoch nicht.

3.3.1 Kennzahl $e_{ges,tx}$

Zunächst wurde die Kennzahl $e_{ges,tx}$ für die KA Asselbrunn näher untersucht. Die Abbildung 18 zeigt den spezifischen Gesamtstromverbrauch tagesscharf für die Tage, an denen CSB-Bestimmungen im Zulauf zur KA erfolgten. Zur Vergleichbarkeit mit dem Kennwert aus dem DWA-A 216 wurden die Tageswerte auf Jahreswerte hochgerechnet (auf 365 d/a). Es lag ein Datenzeitraum von 2,5 Jahren (2020 bis Juni 2022) zugrunde. Damit war ein differenzierteres Bild für die Kennzahl e_{ges} möglich und eine Referenzierung zu den betrieblichen Randbedingungen, die insbesondere hinter ungewöhnlich hohen und/oder ungewöhnlich niedrigen Werten liegen.

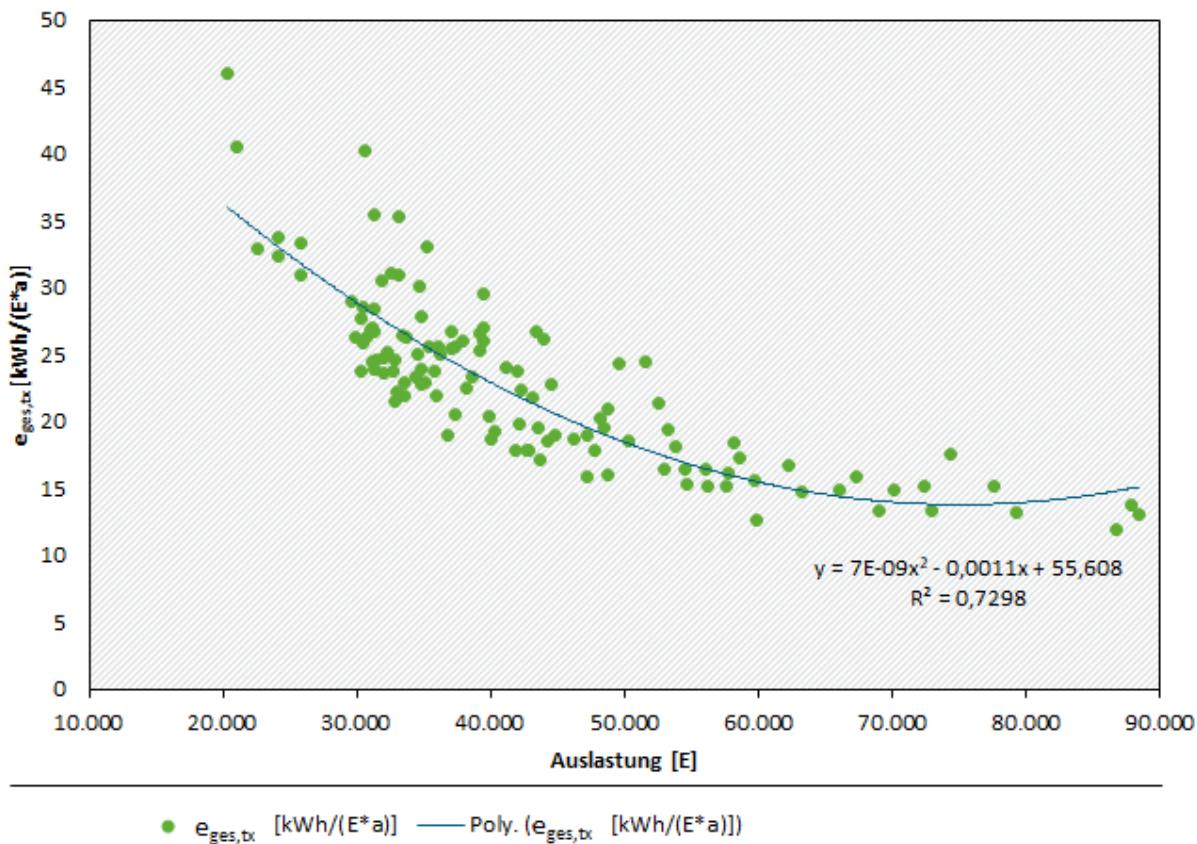
Es zeigte sich bei der tagesbezogenen Betrachtung eine breite Streuung der Werte, wenn $e_{ges,tx}$ auf die Zulauftracht bzw. die tatsächlich angeschlossenen Einwohner bezogen wird. Um den Mittelwert 23 kWh/(E·a) schwankt diese Kennzahl zwischen 12 und fast 46 kWh/(E·a) (Abbildung 18). Die Quartile 25 und 75 sind in Abbildung 18 und ebenfalls eingezeichnet.

Abbildung 18: Kennzahl $e_{ges,tx}$ KA Asselbrunn, zeitliche Anordnung



Quelle: Bitcontrol, KA Asselbrunn

Für die KA Asselbrunn konnte ein recht signifikanter reziproker Zusammenhang zwischen der Kennzahl $e_{ges,tx}$ und der Zulauffracht ermittelt werden (Abbildung 19). Hohe Zulauffrachten, ggf. dominiert durch hohe Anteile an partikulärem CSB, der in der mechanischen Stufe leicht abtrennbar ist, lassen die Kennzahl $e_{ges,tx}$ auf einen Wert unter 15 kWh/(E·a) (Tageswert normiert auf ein Jahr) fallen.

Abbildung 19: Kennzahl $e_{ges,tx}$ KA Asselbrunn in Abhängigkeit von der Auslastung / Zulauffracht

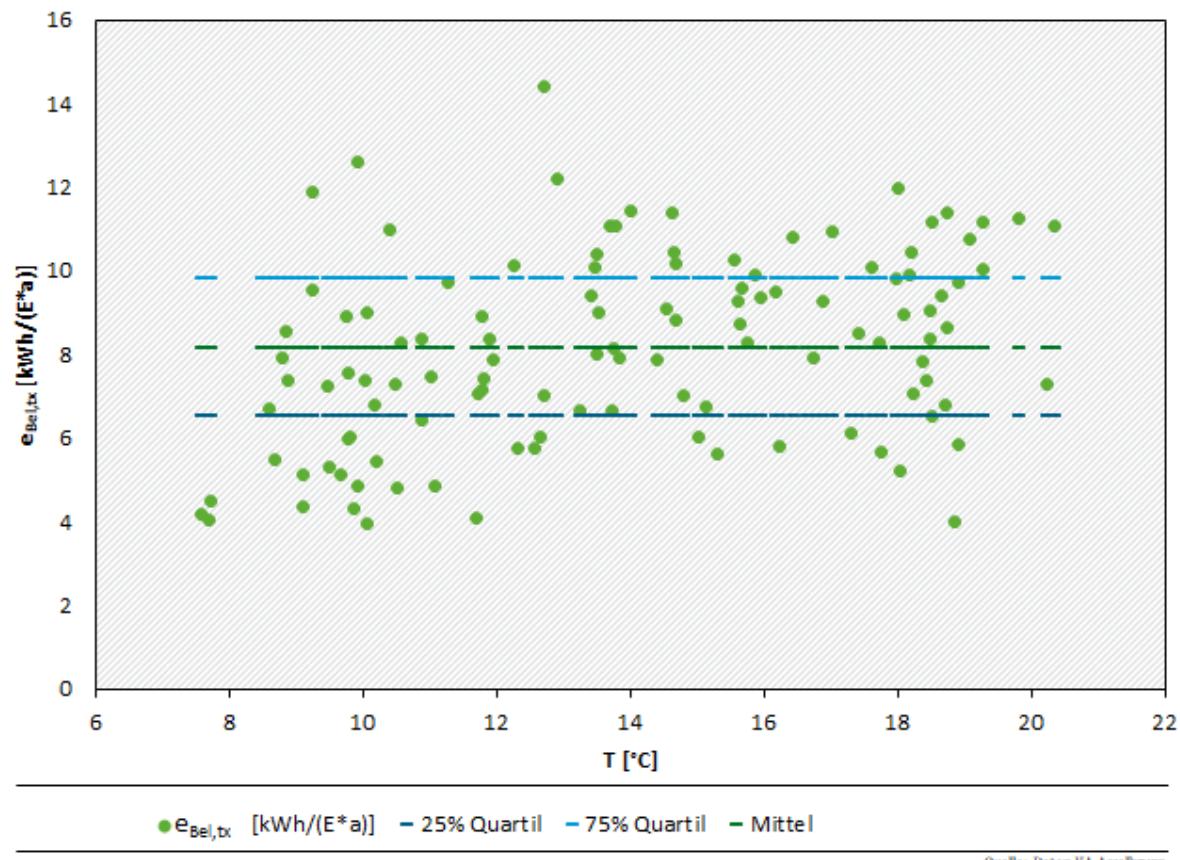
Quelle: Bitcontrol, KA Asselbrunn

Die Kennzahl $e_{ges,tx}$ (modifizierter e_{ges} aus A 216) wurde als sinnvoll und nützlich eingeschätzt, da sie die Referenzierung der Tageswerte bei Auffälligkeiten bzw. Werten weit außerhalb des erwarteten Bereichs zu den jeweiligen betrieblichen Randbedingungen ermöglicht. Insbesondere die Auswertung nach Abbildung 19 gibt Hinweise, unter welchen Randbedingungen die Kennzahl $e_{ges,tx}$ deutlich nach oben abweicht (fast 100 % vom Mittelwert). Dies gibt auch Hinweise, unter welchen Randbedingungen noch deutliche Einsparpotenziale zu erwarten sind und bevorzugt gesucht werden sollten. Im Falle der KA Asselbrunn sind dies insbesondere Tage mit sehr niedriger Auslastung. Der Mehrgewinn aus der Kennzahl $e_{ges,tx}$ kann insbesondere durch den KA-Betreiber realisiert werden. Erkenntnisse daraus bzw. Hinweise für weitere Optimierungen können auch durch mit der Energieoptimierung beauftragten Ingenieuren gewonnen werden.

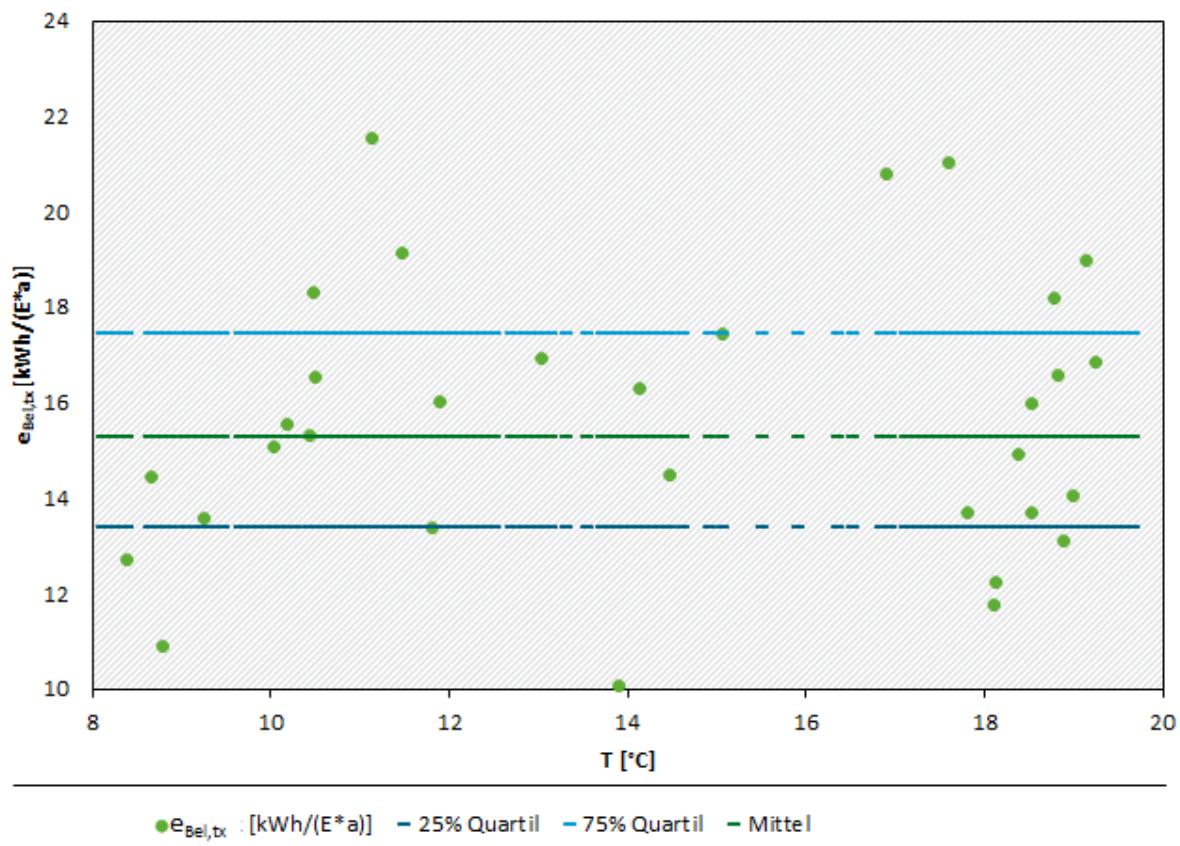
3.3.2 Kennzahl $e_{Bel,tx}$

Die Kennzahl $e_{Bel,tx}$ wurde zunächst als Tageswert in Anlehnung an die Kennzahl e_{Bel} nach DWA - A 216 betrachtet, die jedoch nur das Jahresmittel darstellt. Die Bestimmung der Kennzahl $e_{Bel,tx}$ setzt voraus, dass die Gebläse eigene Stromzähler haben. Analog zu e_{ges} wird in Abbildung 20 und Abbildung 21 auch die Kennzahl $e_{bel,tx}$ zur Darstellung des spezifischen Strombedarfs für die Belüftung über einen kürzeren Bezugszeitraum dargestellt und hier untersucht, welche Abhängigkeiten z. B. von der Temperatur für die KA Asselbrunnen und die KA Kitzingen erkennbar sind. Auch hier wird der Tageswert zur Vergleichbarkeit mit der Kennzahl e_{Bel} nach DWA-A 216 auf 365 d hochgerechnet (normiert).

Abbildung 20: Kennzahl $e_{Bel,tx}$ für die KA Asselbrunn



Quelle: Daten KA Asselbrunn

Abbildung 21: Kennzahl $e_{Bel,tx}$ für die KA Kitzingen

Quelle: Daten KA Kitzingen

Es wurde eine Abhängigkeit der Kennzahl $e_{Bel,tx}$ von der Temperatur vermutet, die jedoch für beide KA in obiger Abbildung jedoch nicht erkennbar ist. Andere Einflussfaktoren überlagern diesen zunächst vermuteten Zusammenhang.

Eine zusätzliche statistische Auswertung der Daten zeigt die große Schwankungsbreite von 4 bis 14 kWh/(E·a) für die KA Asselbrunn bei einem Mittelwert von nur 8 kWh/(E·a). Dies ist ein sehr günstiger Wert. Die sehr niedrigen Werte der Kennzahl $e_{Bel,tx}$ resultieren aus Ereignissen mit sehr hohen Frachten bzgl. des partikulären CSB im Zulauf, die jedoch überdurchschnittlich stark in der mechanischen Stufe eliminiert werden und somit in der biologischen Reinigung nur in sehr stark geminderter Konzentration ankommen.

Die Kennzahl $e_{Bel,tx}$ zeigt auch für die KA Kitzingen eine große Schwankungsbreite auf, was auf hohe Frachten insbesondere durch Spülstöße aus dem verzweigten und langen Kanalnetz zurückzuführen sein könnte. Dies konnte anhand der zeitlichen Zuordnung, der sonstigen gemessenen Parameter und nach Rücksprache mit dem KA-Personal verifiziert werden. Sowohl der Mittelwert als auch der Medianwert betragen 15,3 kWh/(E·a) und entsprechen dem Erwartungsbereich bzw. den von anderen Kläranlagen bekannten Werten für die Kennzahl e_{Bel} – allerdings im Jahresmittel. Verglichen zur KA Asselbrunn ist er jedoch fast doppelt so hoch. Erklärungen dafür konnten nicht gefunden werden, ggf. besteht ein Sanierungsbedarf bei den Belüfterelementen.

Ein Zusammenhang zwischen Zulaufbelastung und spezifischen Energiebedarf zeigt sich in Abbildung 22 und Abbildung 23 für beide Kläranlagen. Allerdings liegen hier nur Messwerte vom Anlagenzulauf und nicht vom Zulauf zur biologischen Stufe vor. Bei sehr hohen Zulauffrach-

ten wird ein überproportionaler Anteil der organischen Verbindungen bereits in der Vorklärung abgeschieden, so dass sich hier bei sehr hohen Zulauffrachten tendenziell deutlich geringere Stromverbräuche ergeben. Insgesamt erbringt diese Kennzahl für die KA Asselbrunn im betrachteten Zeitraum nach

Abbildung 22 keine verwertbaren Erkenntnisse. Nach Abbildung 21 ist eine Tendenz analog zur KA Asselbrunn zu erkennen. Über längere Zeit kann sicher die Alterung der Belüftermembranen über Kennzahl $e_{Bel,tx}$ erkannt werden.

Abbildung 22: Spezifischer Strombedarf Belüftung in Abhängigkeit von der Zulaufbelastung KA Asselbrunn

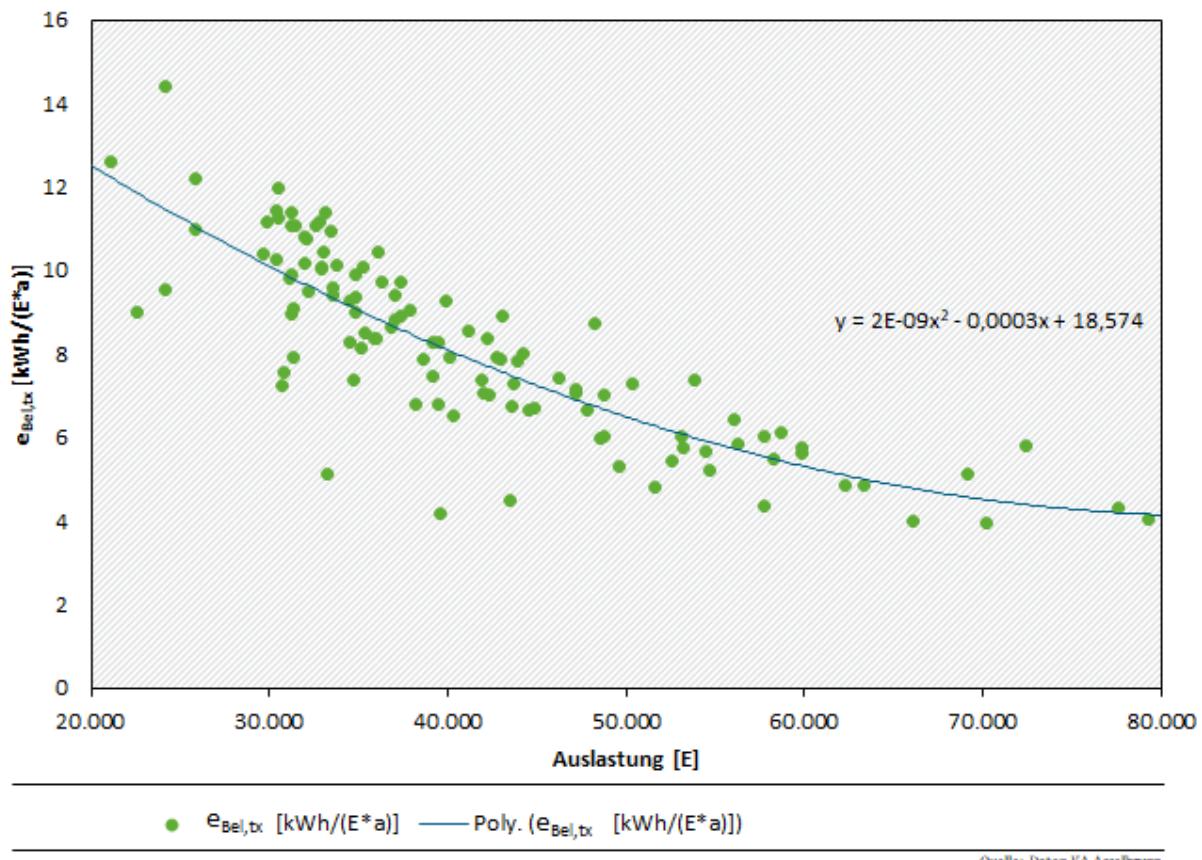
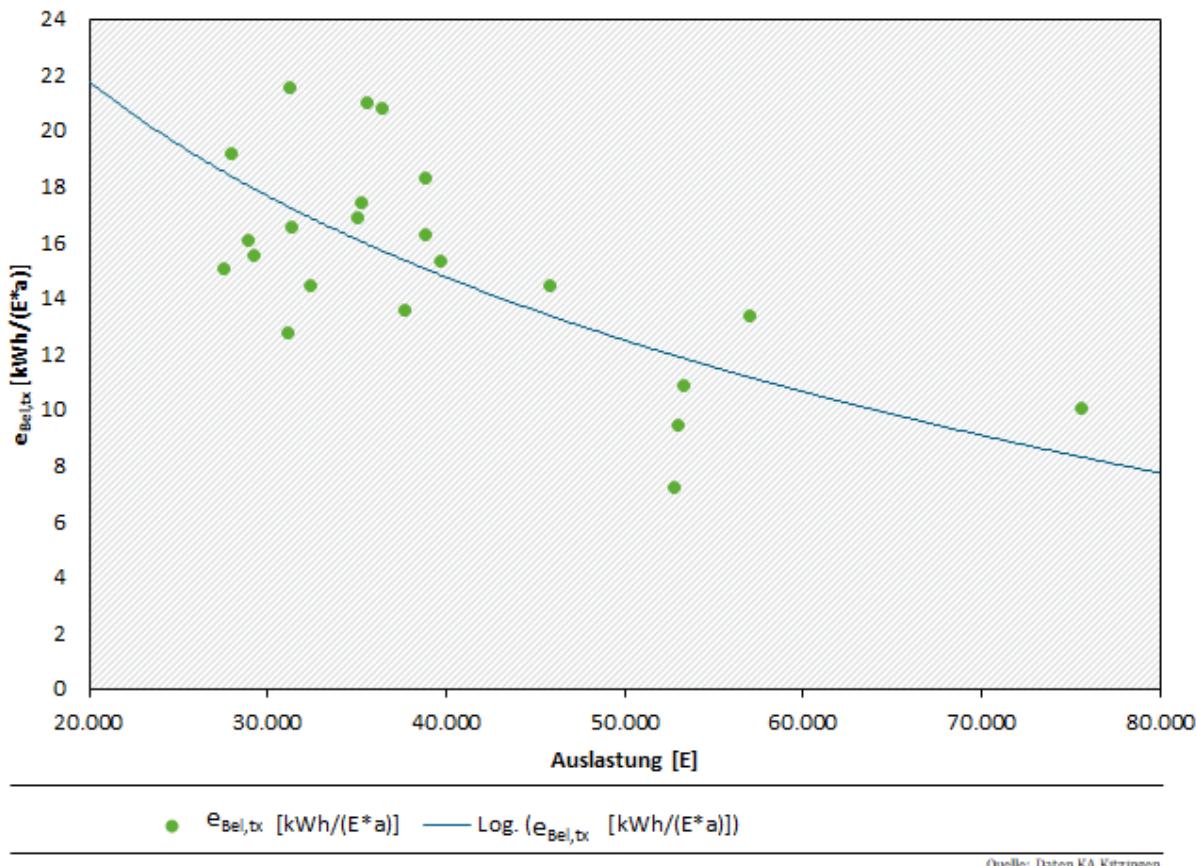


Abbildung 23: Spezifischer Strombedarf Belüftung in Abhängigkeit von der Zulaufbelastung KA Kitzingen



Quelle: Daten KA Kitzingen

Die Randbedingungen für die Entstehung der Kennzahl sind recht eindeutig zuzuordnen. Die Kenntnisse der betrieblichen Randbedingungen kann/soll auch dazu genutzt werden, um Prognosen z. B. in Abhängigkeit von Wetterereignissen und damit verbundenen Zulauffachten geben zu können.

Zur vertieften Untersuchung z. B. der Gebläse wurde die Kennzahl e_{Ver} (spezif. Belüftungsleistung) normiert auf Nm³ Förderleistung und 1 bar Gegendruck untersucht. Da diese in engem Zusammenhang bzw. Konkurrenz zu e_{Bel} steht, erfolgt die Diskussion dieser Kennzahl direkt nachfolgend.

3.3.3 Kennzahl spezifische Belüfterleistung $e_{Ver,tx}$

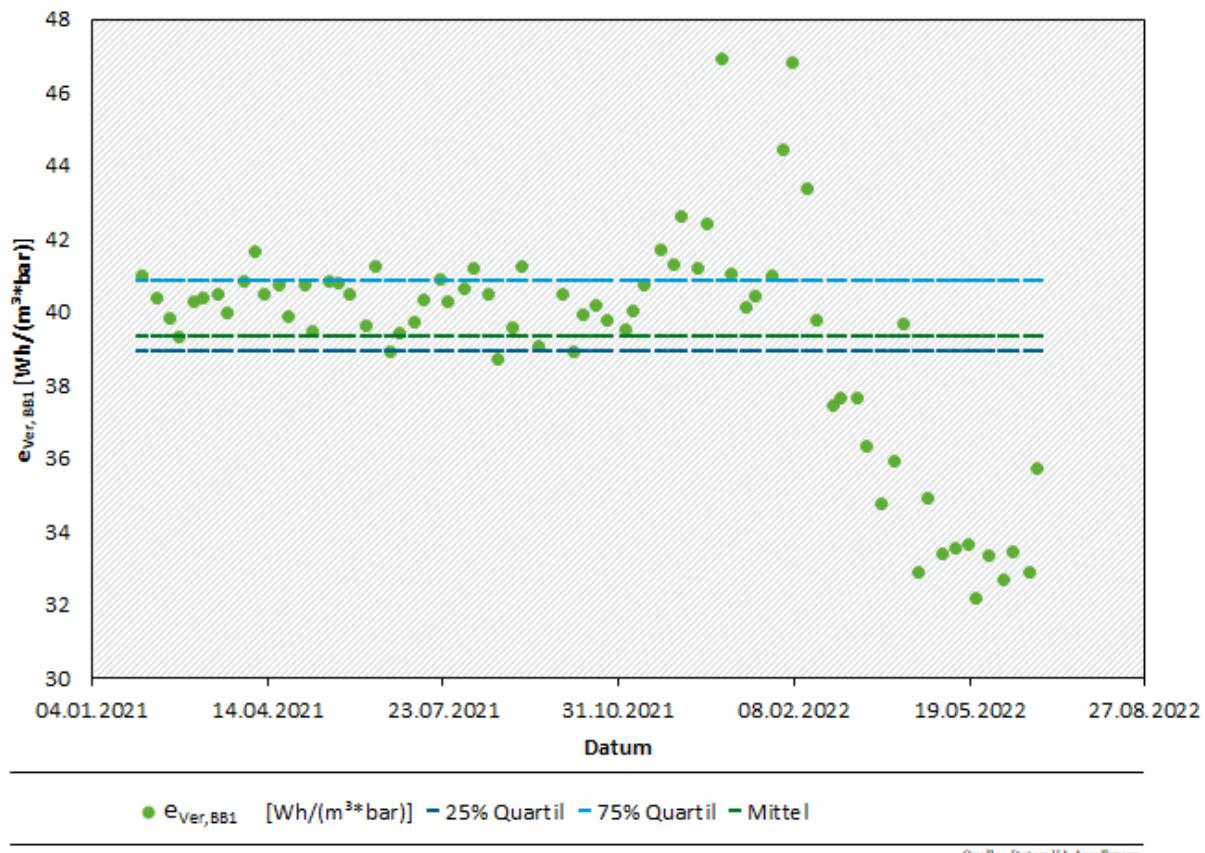
Mit der Kennzahl $e_{Ver,tx}$ wird die Effizienz der Gebläse-/Verdichterleistung untersucht. Die Normierung auf Nm³ geliefertes Luftvolumen und bar erlaubt den Vergleich verschiedener Konfigurationen und Aggregatetypen.

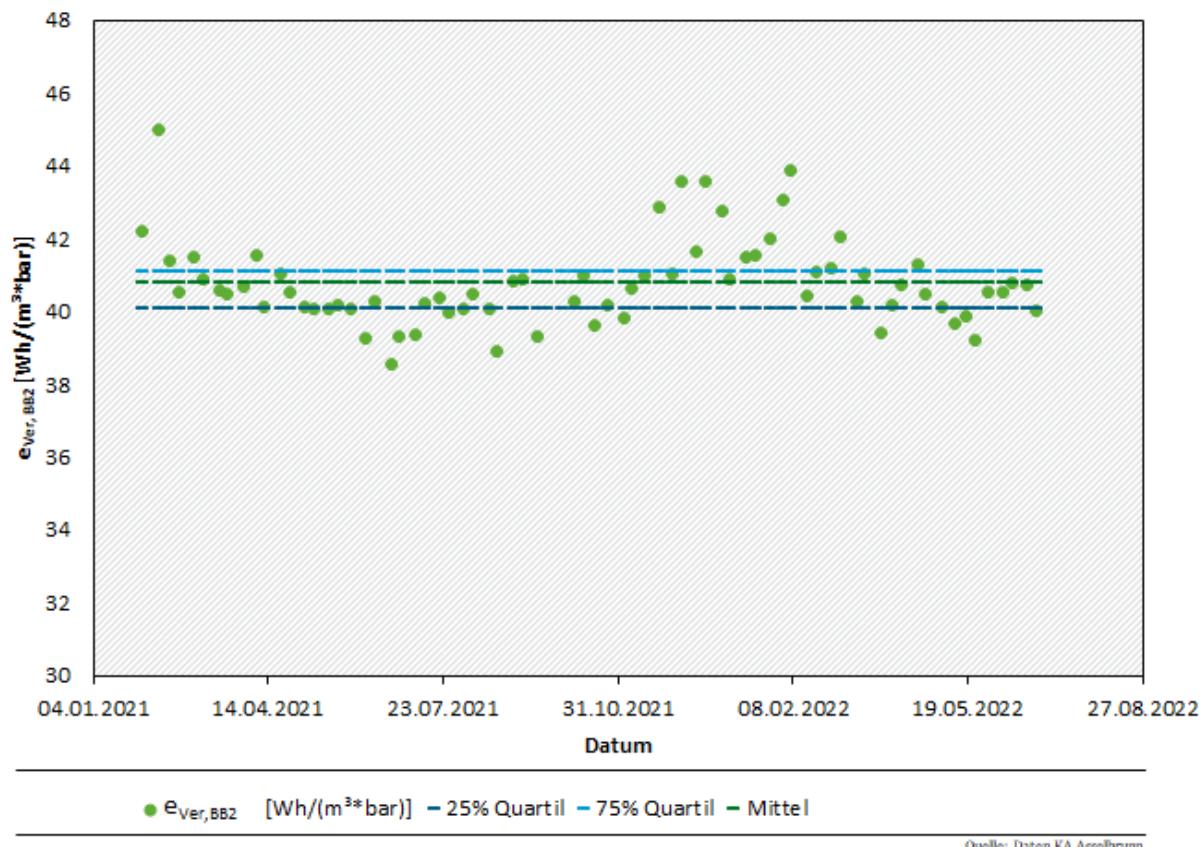
Es werden an der KA Asselbrunn zwei Beckengruppen betrachtet, die jeweils eigene Gebläse haben. Die Luftmenge konnte für jeweils eine Beckengruppe gemessen werden, jedoch arbeiten z. T. zwei Gebläse in die Leitung für eine Beckengruppe.

Für die KA Kitzingen kann die Kennzahl nur als Summe über alle Gebläse und Beckengruppen untersucht werden.

In Abbildung 24 wird sichtbar, dass die Kennzahl in beiden Beckengruppen lange Zeit nur in einem engen Band zwischen ca. 39 und 42 Wh/m³*bar liegt. Im Winter 2021/2022 ist in BB1 ein deutlicher Anstieg der Kennzahl $e_{Ver,tx}$ zu sehen, in BB2 ein geringer Anstieg.

Abbildung 24: Kennzahl e_{Ver} KA Asselbrunn (oben BB1, unten BB2)



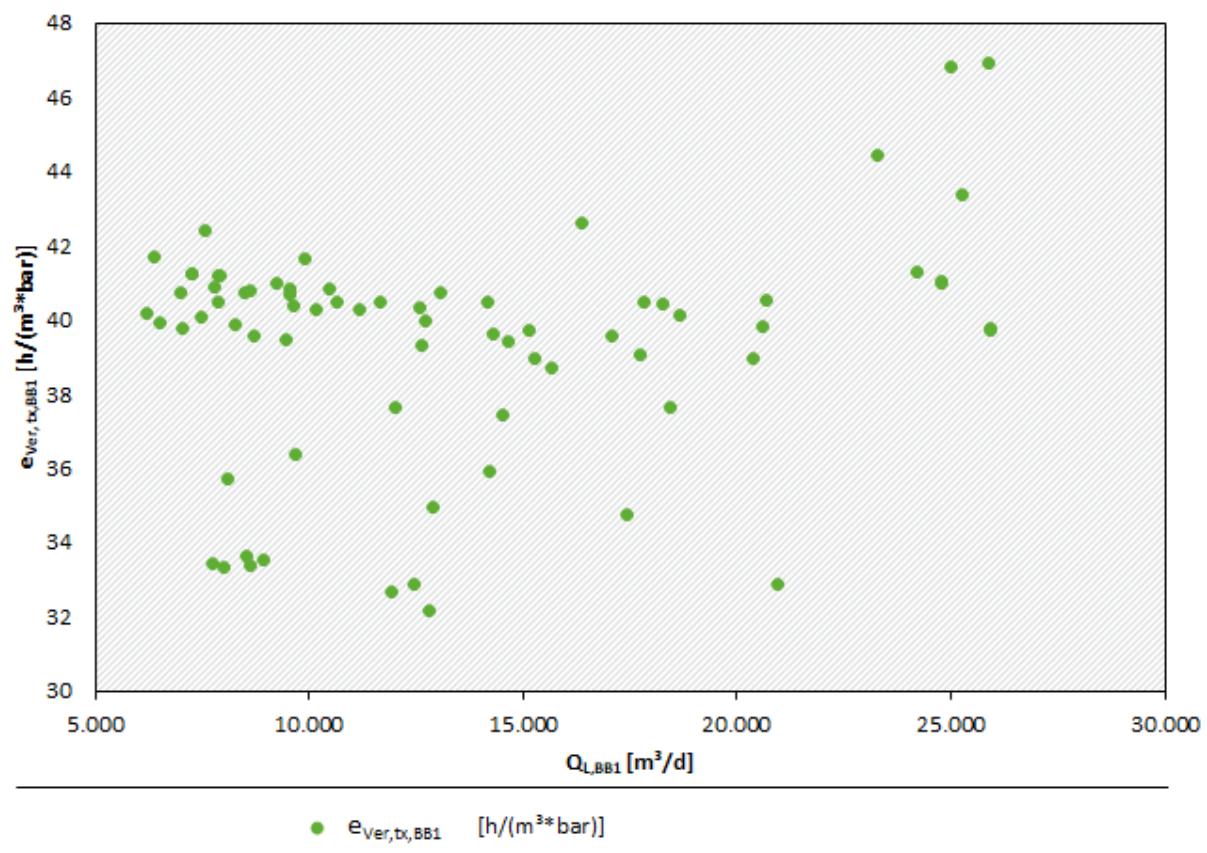


Quelle: Daten KA Asselbrunn

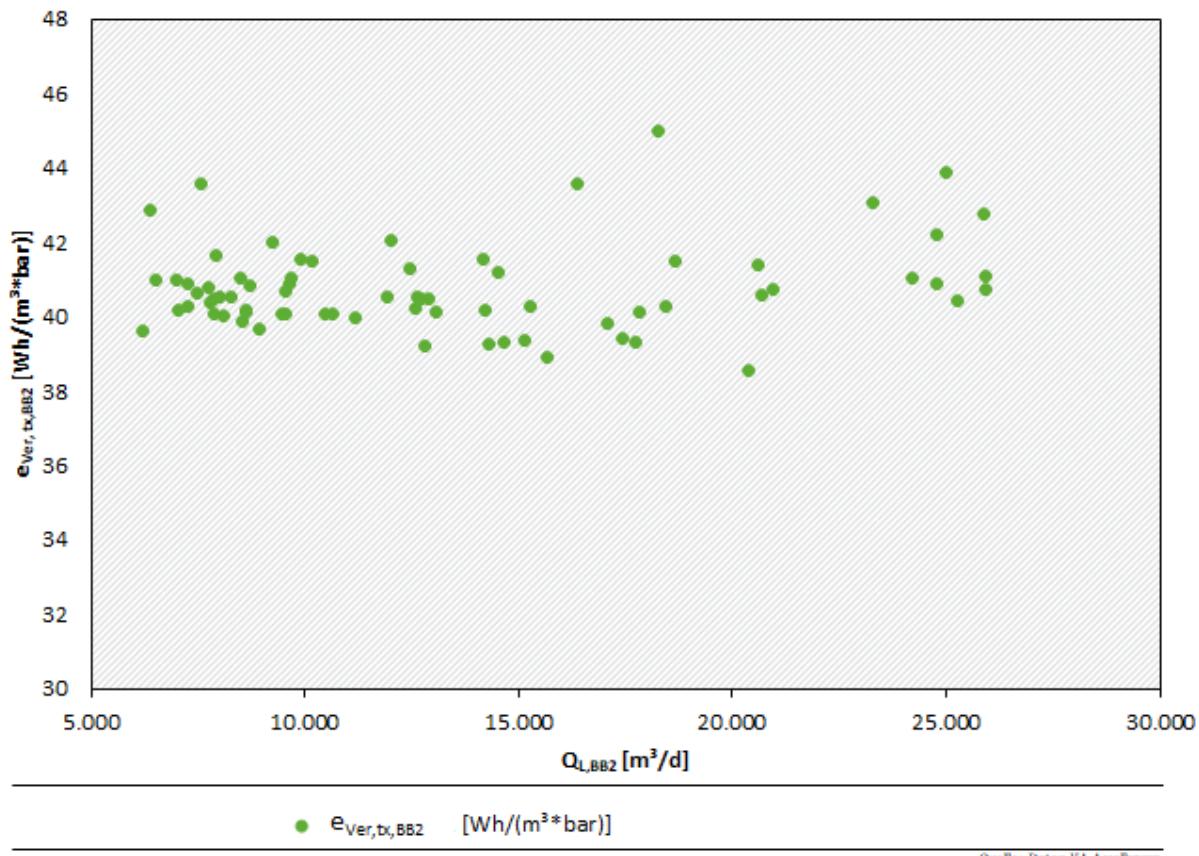
Weiterhin wurde untersucht, ob die geförderte Luftmenge einen Einfluss auf die Kennzahl e_{Ver} hat (Abbildung 25: Kennzahl e_{Ver} KA Asselbrunn, Untersuchung Abhängigkeit von Q_L für BB1 und Abbildung 26). Auch hier konnte für beide Beckengruppen und die zugehörigen Gebläse kein signifikanter Einfluss festgestellt werden. Die Gebläse arbeiten hier mit recht konstantem Wirkungsgrad unabhängig von der geförderten Luftmenge.

Auch wenn an dem hier untersuchten Beispiel und den Zahlenwerten die Kennzahl e_{Ver} keine besonderen Auffälligkeiten sichtbar gemacht hat, wird diese Kennzahl für sinnvoll erachtet. Damit kann im Jahresverlauf nachvollzogen werden, wie effizient/ineffizient die Gebläse arbeiten. In Kombination mit Druckmessungen im Belüftungssystem kann dieses energetisch kontinuierlich überwacht werden. Ein besonderes Augenmerk ist sicher auf die Kalibrierung und Eignung der Luftpengenmessgeräte zu legen. Um Trends zu erkennen, sind sicher längere Zeiträume bzw. eine größere Anzahl an Messwerten zu betrachten. Sollten Abweichungen vom üblichen Bereich auftreten, sind diese Ansatzpunkt für weitere Untersuchungen zu den Ursachen und evtl. der Verschlechterungen der Effizienz.

Abbildung 25: Kennzahl e_{ver} KA Asselbrunn, Untersuchung Abhängigkeit von Q_L für BB1



Quelle: Daten KA Asselbrunn

Abbildung 26: Kennzahl e_{Ver} KA Asselbrunn, Untersuchung Abhängigkeit von Q_L für BB2

Mit dieser Kennzahl kann jedoch nur die Effizienz des Lufteintrages in die biologische Stufe bewertet werden – faktisch die Effizienz des Aggregates und des Lufteintragsystems. Die Effizienz bzgl. der biologischen Ausnutzung des eingetragenen Sauerstoffs bzw. die Einschätzung ob die eingetragenen Luftpunkten biochemisch notwendig sind, kann nur in Relation zu den Frachten zur biologischen Stufe erfolgen, wobei Kohlenstoff- und Stickstoffparameter zu berücksichtigen sind.

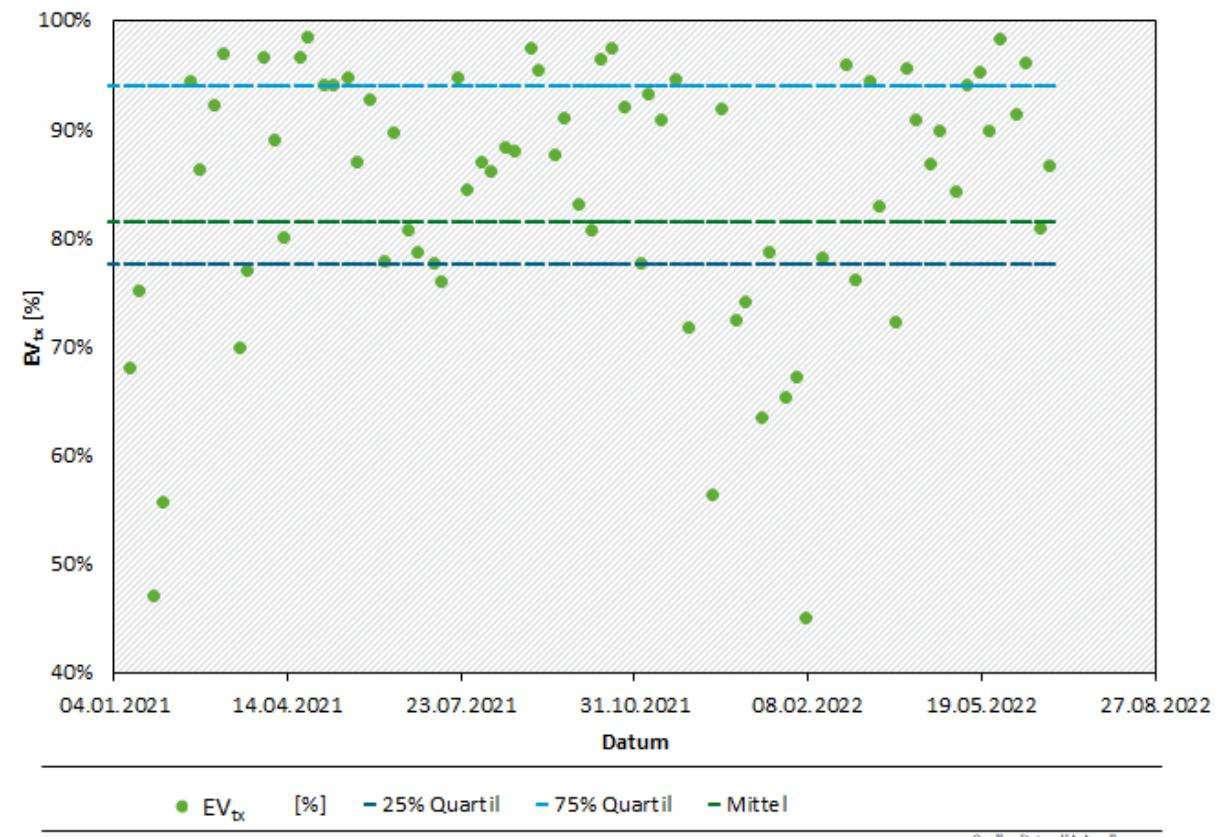
Die Kennzahl $e_{Ver,tx}$ ist ein Mehrgewinn für KA Betreiber, denn durch frühe Kenntnis von Verschlechterungen besteht die Möglichkeit, zeitnah Gegenmaßnahmen bei Anstieg von $e_{Ver,tx}$ einzuleiten. Zur Abschätzung des Nutzens kann ein Praxisbeispiel dienen, bei dem jedoch eine Abhängigkeit des spezifischen Energiebedarfes von der Fördermenge besteht. So entsteht beispielsweise die Frage, ob ein häufig auf KA eingesetztes Gebläse mit 45 kW Motor durch ein kleineres Gebläse ersetzt werden kann. Das große Gebläse 45 kW arbeitet ca. 1.000 Bh/a in der Schwachlastzeit mit nur bei 1/3 Auslastung und damit einem nicht optimalen spezifischen Verbrauch von 40 Wh/m³*bar. Für die Schwachlastzeit, wo nur 1/3 der Leistung des 45 kW Gebläses abgerufen wird, könnte ein Gebläse eingesetzt werden, das mit nur 36 Wh/m³*bar auskommt und somit mit einer Einsparung in der spez. Leistung von 10 % erzielen kann. Hier besteht im Schwachlastbereich ein Einsparpotenzial von ca. 4.500 kWh jährlich. Diese Situation kann durchaus repräsentativ eingeschätzt werden, da es sehr viele Kläranlagen mit Gebläsen in diesem Bereich von 5.000 bis 20.000 m³/h gibt. Dabei handelt es sich zumeist um Anlagen mit einer Anschlussgröße zwischen 30.000 E und 100.000 E.

3.3.4 Kennzahl Eigenversorgungsgrad EV_{tx}

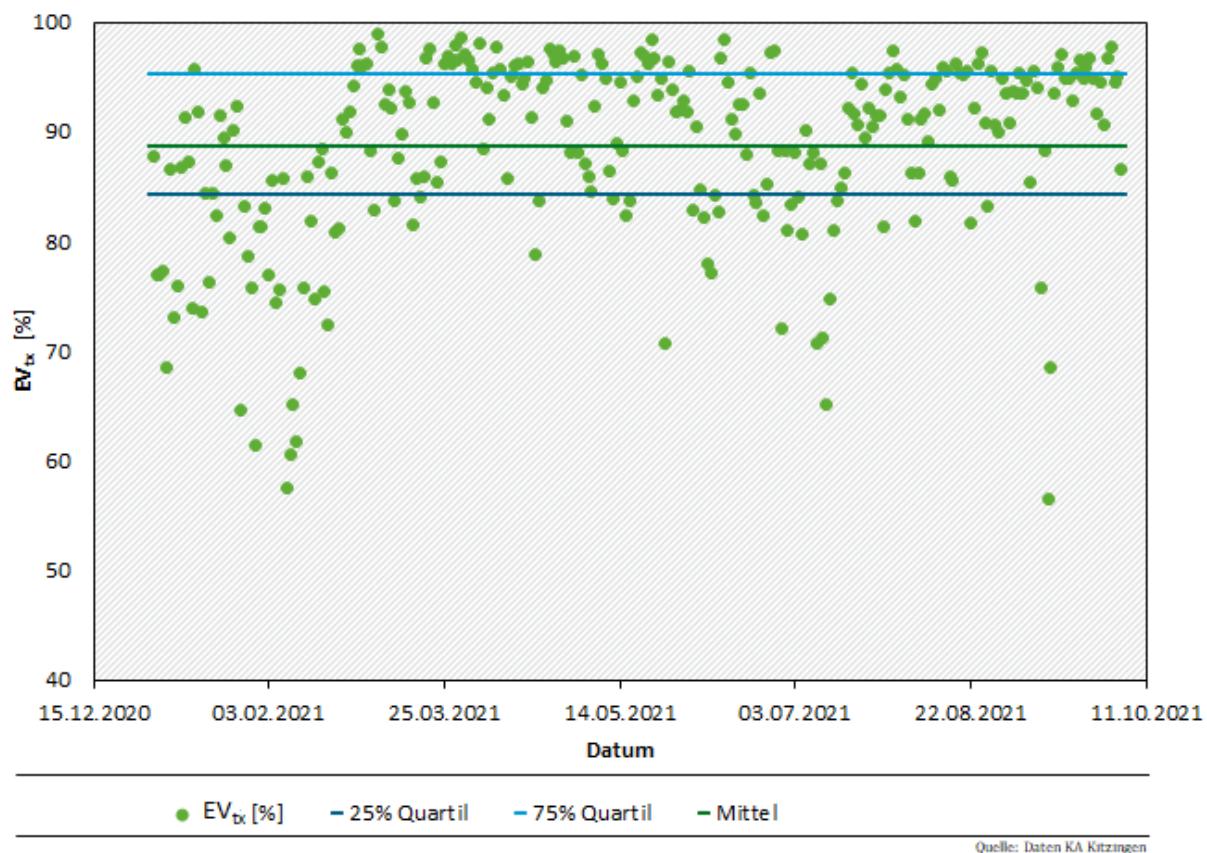
Der Eigenversorgungsgrad bzgl. Strom konnte auf verschiedene Bezugszeiträume (EV_{tx}) bzw. auch auf den Parameter elektrische Leistung EV_p – hier dann sogar als Momentanwert - ausgeben bzw. dargestellt werden, womit ein hohes Maß an Transparenz und vor allem die Zuordnung von Zeit und Kontext möglich wird.

Hier an den Beispielen der KA Asselbrunn und der KA Kitzingen zeigt sich der hohe Eigenversorgungsgrad, der insbesondere auf der KA Kitzingen durch den hohen Co-Substratanteile in der Faulung bedingt war. Der hohe Eigenversorgungsgrad der KA Asselbrunn resultiert auch aus der großen PV-Anlage zusätzlich zum BHKW (KA Kitzingen, 2021).

Abbildung 27: Kennzahl Eigenversorgungsgrad EV_{tx} der KA Asselbrunn



Quelle: Daten KA Asselbrunn

Abbildung 28: Kennzahl Eigenversorgungsgrad EV_{tx} der KA Kitzingen

Quelle: Daten KA Kitzingen

In Abbildung 28 zeigt die statistische Auswertung, dass die KA Kitzingen einen Eigenversorgungsgrad von ca. 88 % im Mittel und nahezu 99 % in der Spitze aufweist. Das untere 2 5%-Quartil zeugt mit einem Wert von 85 % für den Eigenversorgungsgrad davon, dass an einer sehr großen Anzahl der Tage sehr hohe Eigenversorgungsgrade erreicht werden. Nur an wenigen Tagen sinkt dieser in die Nähe von 60 %, was für viele Kläranlagen bereits ein Eigenversorgungsgrad im oberen Spektrum darstellt.

Weiterhin wird untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen Eigenversorgungsgrad und Temperatur besteht, was sich jedoch nicht bestätigte, vielmehr bestimmt hier mit großer Wahrscheinlichkeit die zugeführte Co-Substratmenge den Eigenversorgungsgrad.

Der Eigenversorgungsgrad bezogen auf die Momentanleistung erweist sich zudem als eine geeignete Größe für das Energiemanagement – hier z. B. bzgl. der BHKW Steuerung. Die transparente Darstellung des Eigenversorgungsgrades im Jahresgang bzw. die statistische Auswertung kann auch bei der Abschätzung und vertraglichen Festlegung der Residuallast helfen, die aus dem Netz bezogen werden darf bzw. sanktionsfrei bezogen werden kann. Die Kenntnis der Randbedingungen für besonders niedrige bzw. besonders hohe Eigenversorgungsgrade könnte wiederum genutzt werden, um hier die notwendigen Randbedingungen so zu steuern, dass möglichst gleichmäßig hohe Eigenversorgungsgrade erreicht werden. Zukünftig wird dies noch stärker an Bedeutung gewinnen, wenn vermehrt PV-Anlagen in KA-Netze einspeisen. Das Thema netzdienlicher Betrieb der Eigenversorgungsanlagen ist sicher ein weiteres Zukunftsthema.

3.3.5 Kennzahl $e_{pW,tx}$

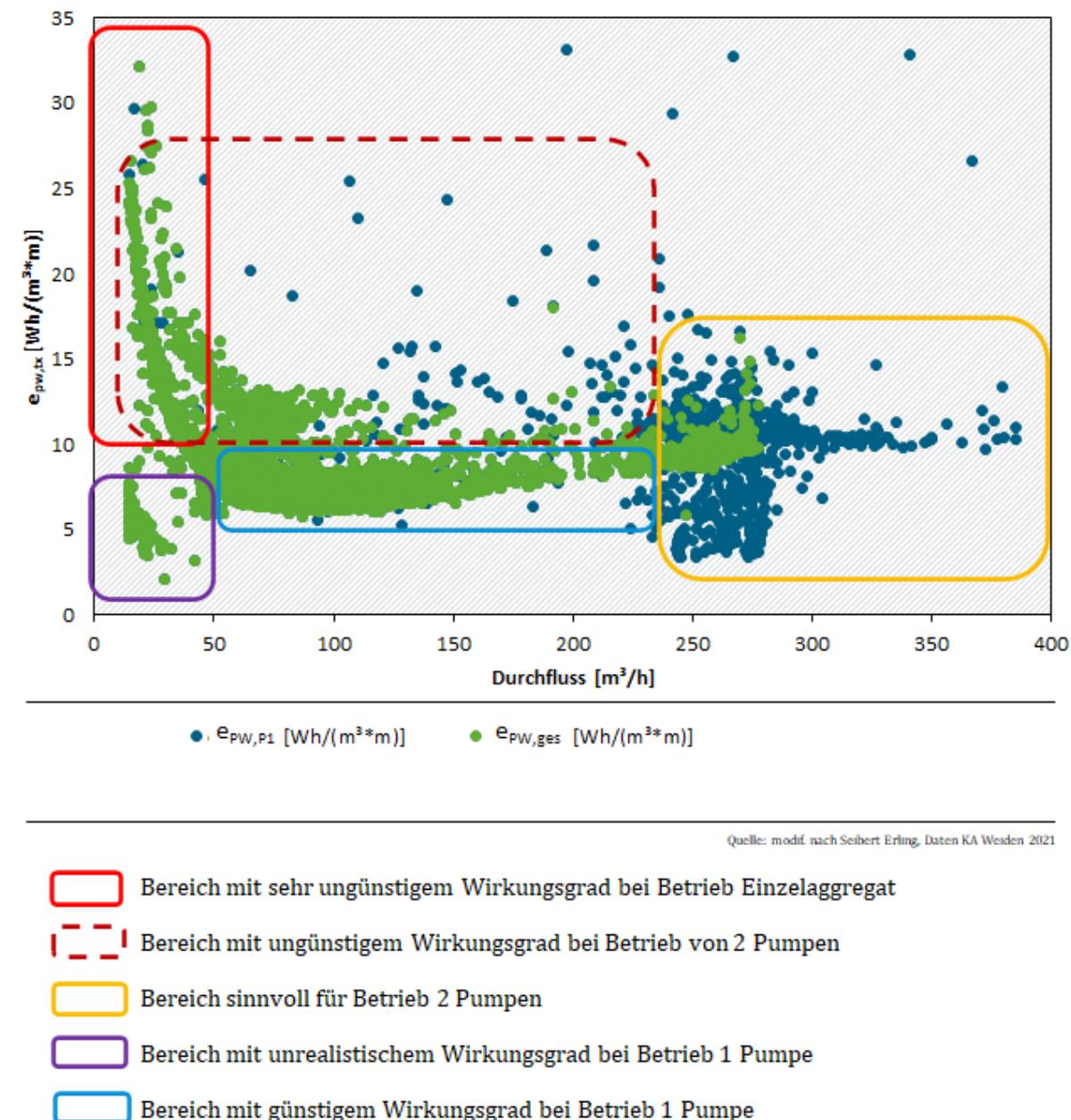
Die Kennzahl $e_{pW,tx}$ beschreibt den spezifischen Stromverbrauch eines Pumpwerks und stellt eine spezifische Kennzahl dar, von der erwartet wurde, dass sie vor allem auch bei sehr kurzen Betrachtungszeiträumen wertvolle Aussagen liefern kann. Dies haben die Auswertungen an Pumpwerken auf der KA Asselbrunn und KA Köln-Weiden gezeigt. Hier wurde $e_{pW,tx}$ dem Gesamtförderstrom des Pumpwerkes [m^3/h] gegenübergestellt. Es konnte anhand der sehr hohen Anzahl von mehr als 18.000 Messwerten sichtbar gemacht werden, welche Bandbreite an Messwerten in der Praxis auftreten können, welche Bereiche das Optimum darstellen und in welchen Bereichen der Fördermenge besonders ungünstige Werte auftreten (Vgl. Abbildung 29). Dabei hilft diese Darstellung auch fehlerhafte Daten herauszufiltern z. B. wenn elektrische Werte (mittlere Leistung in kW als Stundemittel der el. Arbeit in kWh) auf zu kurze Förderintervalle (wenige Minuten) bezogen werden.

In der folgenden Abbildung 29 werden die Betriebspunkte des Einzelbetriebs und des gemeinsamen Betriebes zweier Pumpen eines Pumpwerkes der KA Köln-Weiden in Kennfeldern mit ca. 18.000 Datenpunkten für die Kennzahl e_{pW} dargestellt. Es war jedoch nur ein MID in der Sammelleitung aller Pumpen des Pumpwerkes eingebaut, so dass nur die Betriebssituation P1 allein bzw. zwei Pumpen parallel dargestellt werden können. Das hier gezeigte Beispiel ist mit recht effizienten Lagerstuhlpumpen, jedoch immer noch mit Freistromrad ausgerüstet.

Bei Sichtung der Betriebspunkte wird deutlich, dass diese mit $10 \text{ W/m}^3 \cdot \text{m}$ und weit über $20 \text{ W/m}^3 \cdot \text{m}$ sehr deutlich aus dem optimalen Bereich für $e_{pW,tx}$ hinausragen. Nach entsprechenden Nachforschungen wurden auch die Ursachen für diese hohen spezifischen Werte gefunden, die hier in Luftein schlüssen bzw. der ungewollten Luftansaugung resultierten (Seibert Erling, 2021).

Im gezeigten Beispiel wird sichtbar, dass nahezu über den gesamten Bereich Betriebszustände zu verzeichnen waren, wo unnötigerweise zwei Pumpen parallel gearbeitet haben. Dabei lag die Kennzahl $e_{pW,tx}$ meist zwischen $10 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{m}$ und bis über $30 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{m}$.

Die Pumpe P1 war in der Lage, Wassermengen von bis ca. $220 \text{ m}^3/\text{h}$ mit recht ansprechender Effizienz zwischen 7,5 und max 10 Wh/m^3 zu bewältigen (Abbildung 29). Das Optimum für P1 lag zwischen $50 \text{ m}^3/\text{h}$ und $180 \text{ m}^3/\text{h}$ bei Werten zwischen $6 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{m}$ und $8 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{m}$ (grün umrandeter Bereich). Eine Häufung ungünstiger Werte für $e_{pW,tx}$ zwischen 50 und $100 \text{ m}^3/\text{h}$ war auf die eingangs genannten Betriebsprobleme (Luft im Ansaugbereich der Pumpe) zurückzuführen (oberhalb des grün umrandeten Bereichs).

Abbildung 29: Stark verdichte Daten der Kennzahl $e_{PW,tx}$ KA Köln-Weiden

Unrealistisch niedrige Werte für $e_{PW,tx}$ für Pumpe 1 kennzeichnet der violett umrandete Bereich (10 bis 50 m^3/h). Hier ist zu prüfen, ob ggf. die Messwerte plausibel waren bzw. ob im gesamten Zeitintervall die P1 in Betrieb war. Von der KA Asselbrunn sind in ähnlichem Zusammenhang auch Fehler in der messtechnischen Erfassung der elektrischen Leistung detektiert worden und zwar dann, wenn die Kennzahl unter dem theoretischen Wert bzw. unter einem günstigen Betriebswert lag.

Andererseits erzeugen sehr geringe Wassermengen in Verbindung mit Leistungsaufnahmen, die zwar richtig gemessen wurden, jedoch nicht im gesamten Betriebsintervall (1 h) abgefordert wurden, bei linearer Hochrechnung auf eine Stunde unrealistisch hohe Energieverbräuche.

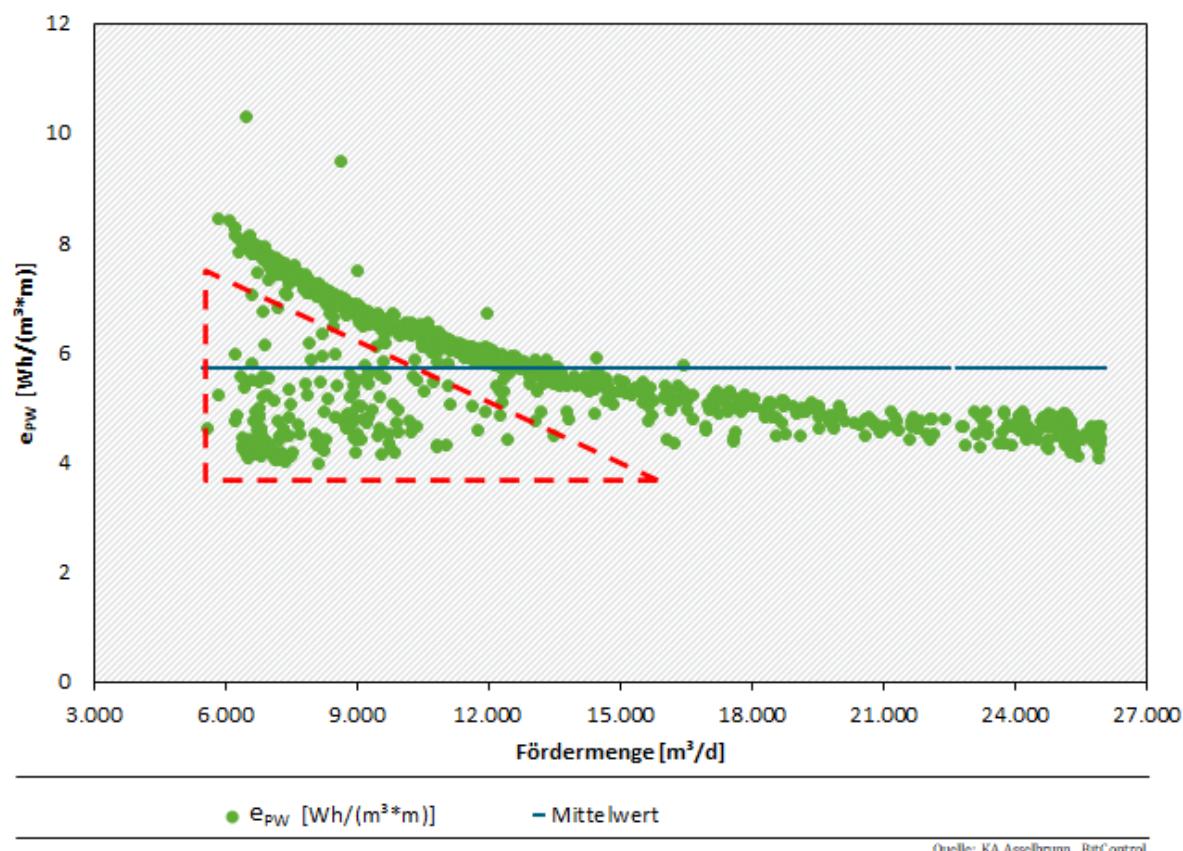
Es konnte zudem sichtbar gemacht werden, dass in einigen Fällen trotz niedriger Fördermengen ein Doppelbetrieb von Pumpen erfolgte, obwohl das nicht notwendig wäre (gestrichelt rot umrandeter Bereich). Dies ist auch auf die zuvor genannte Ursache zurückzuführen. Durch die gra-

fische Darstellung in einer Punktwolke ist auch erkennbar, dass ggf. durch eine Modifizierung der Schaltpunkte der ineffiziente Doppelbetrieb gleich großer bzw. ähnlich großer Aggregate weitgehend vermieden werden kann.

Eine statistische Auswertung der Daten für das Pumpwerk in Köln-Weiden bestätigt die große Streubreite der spez. Leistung des Pumpwerkes eben aus den o.g. Gründen. Dabei ist die Bandbreite zwischen den Quartilen recht eng zwischen 6,6 und 7,57 Wh/m³*m, was auch dafür spricht, dass die überwiegende Anzahl der Betriebspunkte in einem realistischen und recht günstigen Bereich liegt.

Die folgende Abbildung 30 zeigt die Aufnahme der Kennzahl $e_{PW,tx}$ für ein weiteres Pumpwerk – hier das Zulauf-Pumpwerk der KA Asselbrunn. Dieses ist als Schneckenpumpwerk ausgebildet.

Abbildung 30: Kennzahl $e_{PW,tx}$ für Zulauf-PW KA Asselbrunn

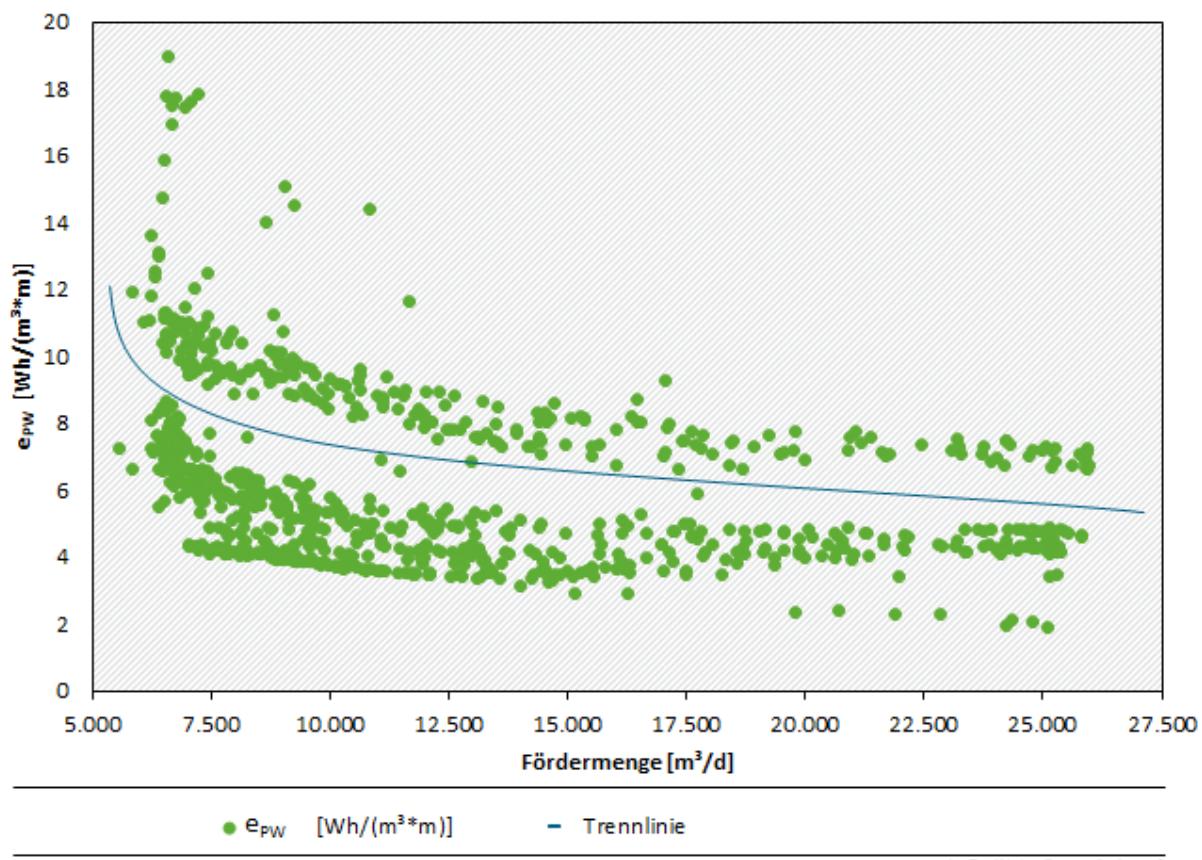


Es ist gut sichtbar, dass die relativ flache Kurve leicht reziprok proportional zur geförderten Wassermenge verläuft. Insbesondere bei hohen Wassermengen liegt die Kennzahl $e_{PW,tx}$ im Bereich der für Pumpen erreichbaren Idealwerte. Die im roten Dreieck eingerahmten Werte sind nicht realistisch für dieses Pumpwerk. Als Ursache wurde ein Fehler in der elektrischen Leistungserfassung identifiziert. Prinzipiell ist eine zeitliche Zuordnung möglich. Die in Abhängigkeit der geförderten Wassermenge errechnete Kennzahl bei Kurzzeitbetrachtung liegt im Bereich geringer Fördermengen um bis ca. 1/3 über dem Mittelwert, bei großen Wassermengen etwa 25 % unter dem Mittelwert (Abbildung 30). Die Detailanalyse zeigt, dass hier bei gleichem täglichen Durchfluss manchmal drei Schnecken und manchmal nur zwei laufen. Bei den wenigen schlechten Kennwerten laufen drei Schnecken. Außerdem ist das Einstauniveau sehr unterschiedlich. Es wurde schon verschiedentlich festgestellt, dass der Wirkungsgrad der Schneckenpumpwerke abnimmt, wenn sie zu hoch eingestaut werden (BITControl, 2021).

Die folgende Abbildung 31 gibt einen Eindruck der Verteilung der Kennzahl $e_{PW,tx}$ für das Zwischenpumpwerk der KA Asselbrunn, welches mit Kreiselpumpen arbeitet.

Die Abbildung 31 zeigt ganz deutlich zwei separate Bereiche der Kennzahl $e_{PW,tx}$. Der untere Bereich – zusätzlich durch die blaue Linie abgetrennt – zeigt Werte, die zu niedrig sind bzw. unterhalb der physikalisch möglichen Werte liegen. Diese zu niedrigen Werte sind auf einen Fehler der Leistungs bzw. Strommessung zurückzuführen. Die Visualisierung der Kennzahl $e_{PW,tx}$ für Stunden- bzw. Tageswerte kann somit auch zur Identifikation von Defekten/Fehlern der Strommessung führen bzw. genutzt werden, wenn eine ausreichende Anzahl richtiger (plausibler) Referenzwerte vorliegen.

Abbildung 31: Kennzahl $e_{PW,tx}$ für das Zwischenhebewerk der KA Asselbrunn

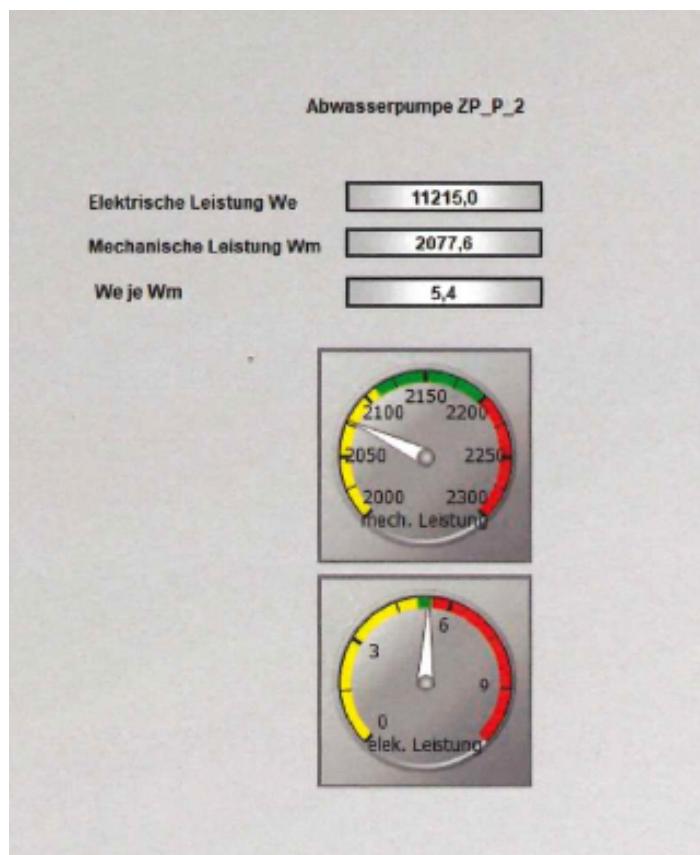


Abseits von diesem Fehler der Leistungsmessung weist dieses Pumpwerk Werte für die Kennzahl $e_{PW,tx}$ auf, die deutlich höher sind im Vergleich zum Zulaufpumpwerk und damit auch den energetischen Nachteil der Kreiselpumpen gegenüber Schneckenpumpe verdeutlichen.

Auf der KA Aachen-Eilendorf wurde die Kennzahl $e_{PW,tx}$ ebenfalls für ein Pumpwerk untersucht. Begleitend wurde jedoch zur direkten Visualisierung für $e_{PW,tx}$ die Tachodarstellung gewählt und basierend auf DWA-A 216 ein Wert von 5,5 Wh/(m³·m) als Optimum angesehen. Hintergrund für die kontinuierliche Erfassung und Darstellung war hier die häufige Verstopfung der Rohabwasserpumpe dieses kleinen Zulaufpumpwerkes zur KA Aachen-Eilendorf, die es schneller zu detektieren galt. Nach zügiger Behebung sich anbahnender Verstopfungen wird auch eine signifikante Energieeinsparung durch Minimierung der Betriebsstunden mit verzopftem Laufrad erzielt, was wiederum dem Betrieber zugutekommt.

Die Tachodarstellung wurde gewählt, da diese sehr schnell eine qualitative Einschätzung des Momentanwerts ohne Kenntnisse der üblichen Betriebswerte zu geben vermag. In Abbildung 32 ist die verwendete Tachodarstellung zur Visualisierung der elektrischen Leistung der o. g. Pumpe auf der KA Aachen-Eilendorf dargestellt.

Abbildung 32: Tachodarstellung für $e_{PW,tx}$ einer Abwasserpumpe im Zulauf zur KA Aachen-Eilendorf, Angabe Volumenstrom in [m³/h], spezif. elektrische Leistung in W/m³*m

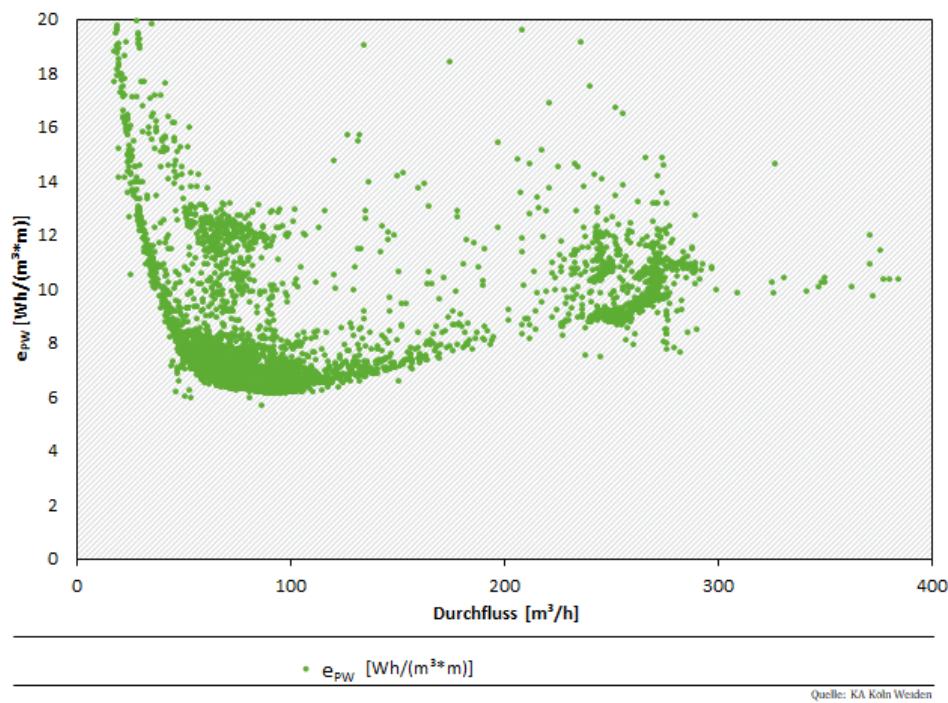


(Quelle: WVER, KA Aachen-Eilendorf)

Weiterhin wird auf der KA Aachen-Eilendorf eine kontinuierliche Analyse und Visualisierung eines Kennwertes für die Beschickungspumpe der Faulschlammentwässerungszentrifuge orientierend an e_{PW} nach A 216 installiert. Hier wird ein spezifischer Wert nach je 1.000 m³ Durchfluss gebildet, dessen Trend über längere Zeit (Wochen/Monate) verfolgt wird. Die spezifischen Stromverbräuche von Drehkolbenpumpen variieren je nach Förderaufgabe. Auch weisen die Drehkolbenpumpen bei viel Feinsand im Schlammbereich merkbaren Verschleiß auf und driften dadurch in einen energetisch immer ungünstigeren Bereich ab, weshalb hier als Bezug der Startwert nach Installation einer neuen Pumpe bzw. nach Wechsel der Kolben gewählt wurde. Ausreichende Ergebnisse lagen zum Zeitpunkt der Erfassung noch nicht vor (KA Eilendorf, 2021).

Ebenso wurde auf der KA Eilendorf die Überwachung eines Schneckenpumpwerktes ebenfalls nach der o. g. Methode angedacht bzw. befindet sich seit kurzem in der Erprobung. Hier ist es ebenfalls sinnvoll, größere Betrachtungszeiträume bzw. Fördervolumina von einigen tausend m³ als Intervall zu wählen, um Langzeitrends zu sehen.

Abbildung 33: Nutzung Kennzahlen e_{PW} für die KA Köln-Weiden zur weiteren Pumpenoptimierung



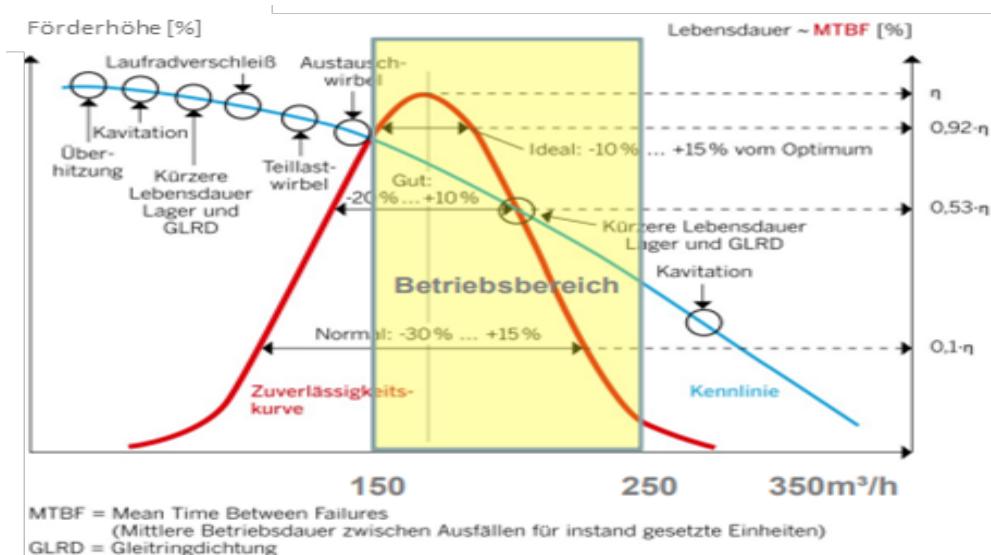
Quelle: KA Köln Weiden

Identifikation von ungünstigen Betriebsbereichen und betrieblichen Problemen



Auswahl geeigneter Aggregate,

Optimierung Pumpensteuerung



Anknüpfend an die Darstellungen in Abbildung 29 bis Abbildung 33 half die Kennzahl $e_{PW,tx}$ bei hoher Messwertdichte Kennfeldaufnahmen zu erstellen, die wiederum geeignet waren, die günstigen und ungünstigen Betriebszustände zu identifizieren bzw. im praktischen Betrieb einzuschränken. Sie ist neben der Erkennung von Betriebsstörungen vor allem Anstoß für weitere Untersuchungen zur Minderung von Druckverlusten im Pumpwerk wertvoll und hilft schließlich auch bei der Wahl von ggf. besser geeigneten Aggregaten. Die Kennzahl $e_{PW,tx}$ ist neben der Betriebsüberwachung somit auch gut für die Vorbereitung von Optimierungen an bestehenden Pumpwerken geeignet.

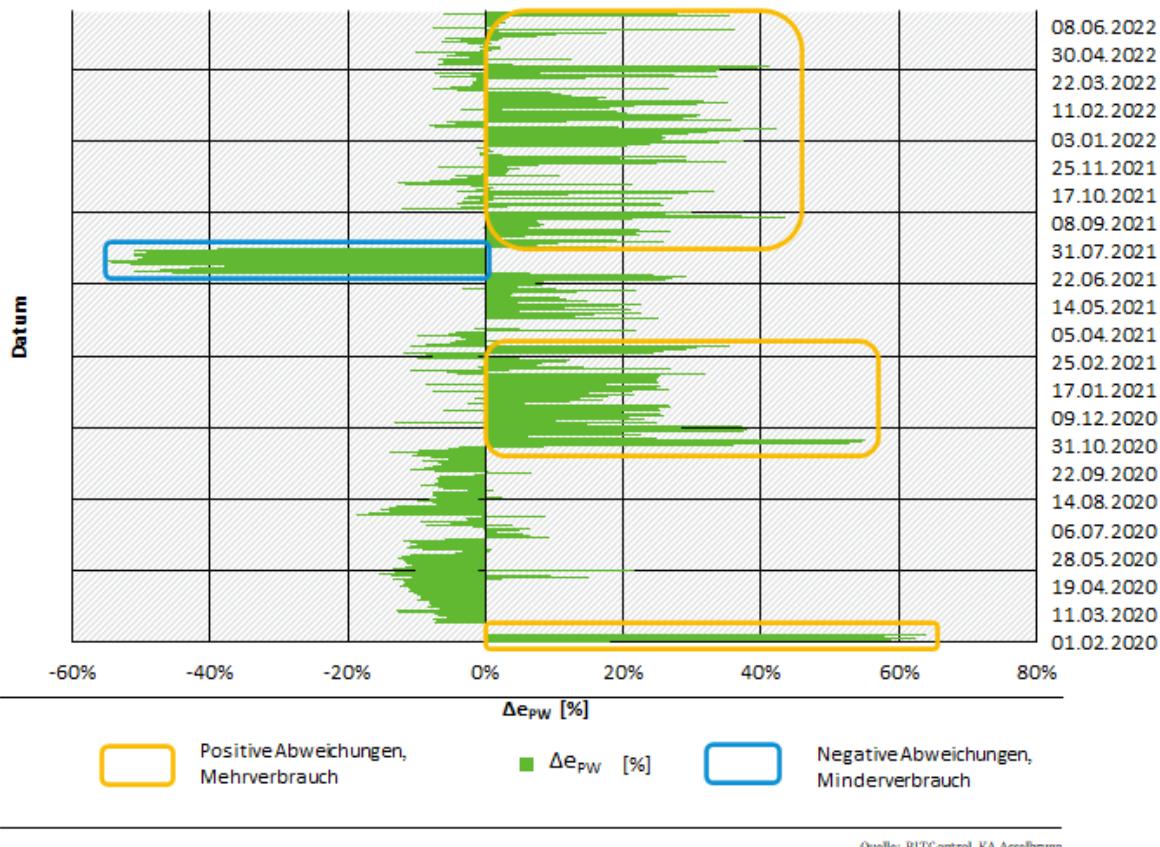
Die Abschätzung des wirtschaftlichen Nutzens soll anhand eines fiktiven Beispiels erfolgen. Geht es z. B. für eine Pumpe mit einer Leistung von 5 KW, die als Dauerläufer mit 7.000 Bh/a arbeitet, i. M. 10 % der Energie einzusparen, würde die jährliche Einparung bei 3.500 kWh/a liegen, bzw. bei einem kWh-Preis von 30 Ct/kWh würde eine finanzielle Ersparnis von 1.050 €/a ermöglicht werden. Daher ist die Kennzahl e_{PW} als sehr sinnvoll und sehr nützlich einzuschätzen und kann dazu beitragen, bereits bei relativ kleinen Aggregaten wirtschaftlich und energetisch interessante Potenziale anzuheben.

3.3.6 Abweichungskennzahl Δe_{PW}

Mit den Abweichungskennzahlen wird das Ziel verfolgt, zeitnah Abweichungen von üblichen Betriebspunkten/Betriebsbereichen zu erkennen. Für die Kennzahl Δe_{PW} wurde ein Startwert gewählt, der den spezifischen Energiebedarf zu Beginn der Zeitreihe repräsentiert. Die Abweichungen davon spiegeln sich in der Kennzahl Δe_{PW} wider.

Nach Untersuchungen an Messwerten der KA Asselbrunn war die Kennzahl Δe_{PW} in der Lage, zeitnah Informationen über den energetischen Zustand des betrachteten Zulaufpumpwerkes zu geben. Sie hat aufgezeigt, dass im Zeitraum vom 01.02.2020 bis 28.02.2020 sehr deutliche Abweichungen im spezifischen Energiebedarf auftraten. Damit war es möglich, recht schnell zu reagieren und z. B. sich anbahnende Verzopfungen sehr frühzeitig zu entfernen, wodurch die Pumpe stets in einem energetisch günstigen Bereich arbeiten konnte (KA Asselbrunn (2022)).

**Abbildung 34: Abweichungsanalyse Δe_{PW} Rücklaufschlammk der KA Asselbrunn,
Startwert: 7 Wh/m³*m**



Quelle: BITControl, KA Asselbrunn

Die Kennzahl Δe_{PW} wurde in Asselbrunn zudem für ein weiteres Pumpwerk (Rücklaufschlamm-pumpwerk) geprüft (Abbildung 34). Auch hier konnten sehr deutlich die Bereiche mit signifikant erhöhtem spezifischem Energiebedarf identifiziert werden (orange eingerahmt). Die Abweichungen vom Bezugswert liegen z. T. bei >50 %. Hier ist es möglich, auf den Tag genau und je nach Datenlage auch stundengenau die jeweilige betriebliche Situation zu prüfen und nach den Ursachen der Abweichung zu forschen. Der rot eingerahmte Bereich kennzeichnet Werte, die deutlich unter dem Startwert liegen und wahrscheinlich auf Probleme bei der Leistungsmessung hindeuten. Potenzielle Ursachen für erhöhte Werte sind Verzopfungen, gelegentlich Verschleiß sowie Lufteinträge/Lufteinträge/Ausgasungen von CO₂ und N₂.

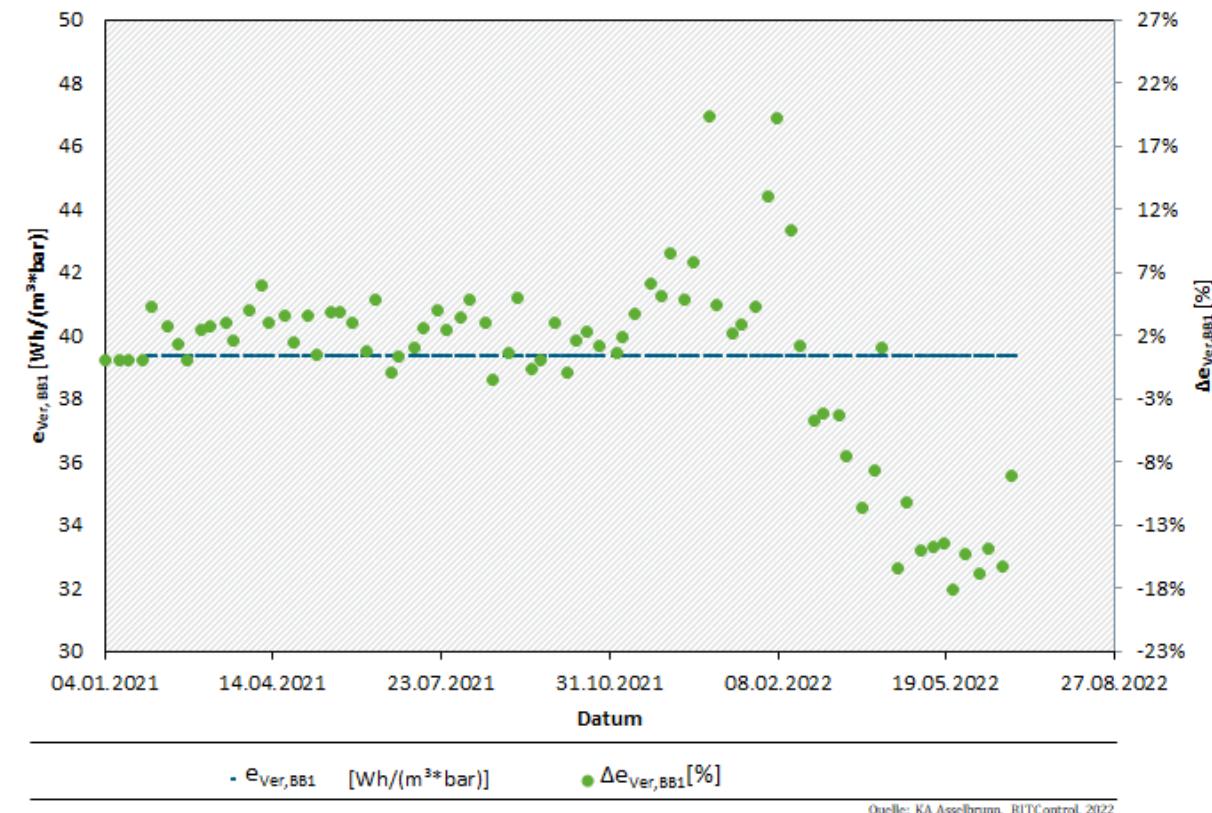
Für die Kennzahl Δe_{PW} wurden klar erkennbare Bereiche der Abweichung sichtbar gemacht und auch die Zuordnung von Zeit und Kontext war gut möglich, daher ist diese Kennzahl ggf. ergänzend zur Kennzahl $e_{PW,tx}$ für den Betreiber der Anlage nützlich, um auch Abweichungen von einem guten Zustand (Sollzustand) über die Zeit zu verfolgen.

3.3.7 Abweichungskennzahl Δe_{VER}

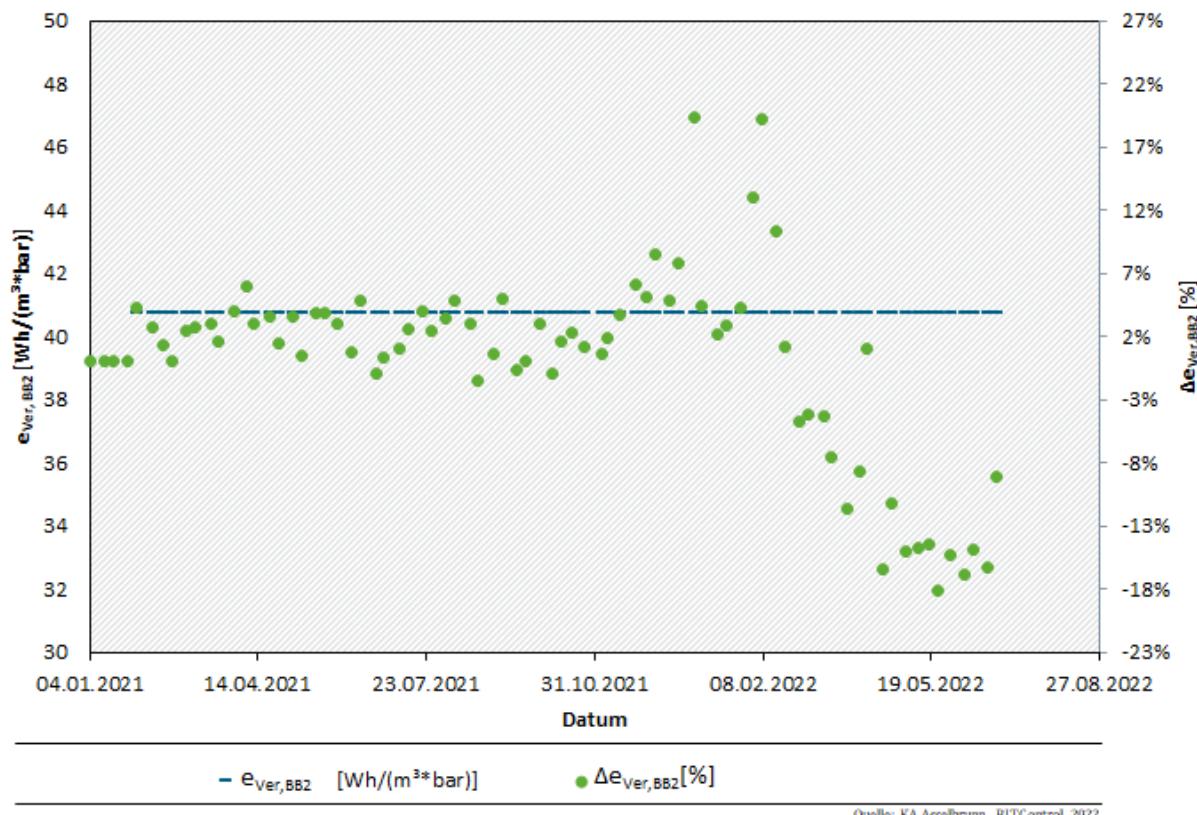
Mit der Kennzahl Δe_{Bel} bzw. Δe_{VER} verband sich die Erwartung, schleichende Veränderungen bzw. spontan eintretende Verschlechterungen der Belüftungseffizienz sichtbar zu machen. In den Diagrammen sind die absoluten Werte für e_{VER} als auch die Abweichung vom Startwert zu sehen. Die Verläufe sind denen aus Abbildung 35 und Abbildung 36 sehr ähnlich, die den spezifischen Stromverbrauch der Belüfter aufzeigten. Daher kann diese Kennzahl Δe_{Bel} durch die Kennzahl

Δe_{Ver} ggf. ersetzt werden. Sinnvoll ist in jedem Fall bei beiden Kennzahlen eine langfristige Trendaufzeichnung.

Abbildung 35: Abweichungskennzahl Δe_{Ver} Gebläse 1 KA Asselbrunn



Quelle: KA Asselbrunn, BITControl, 2022

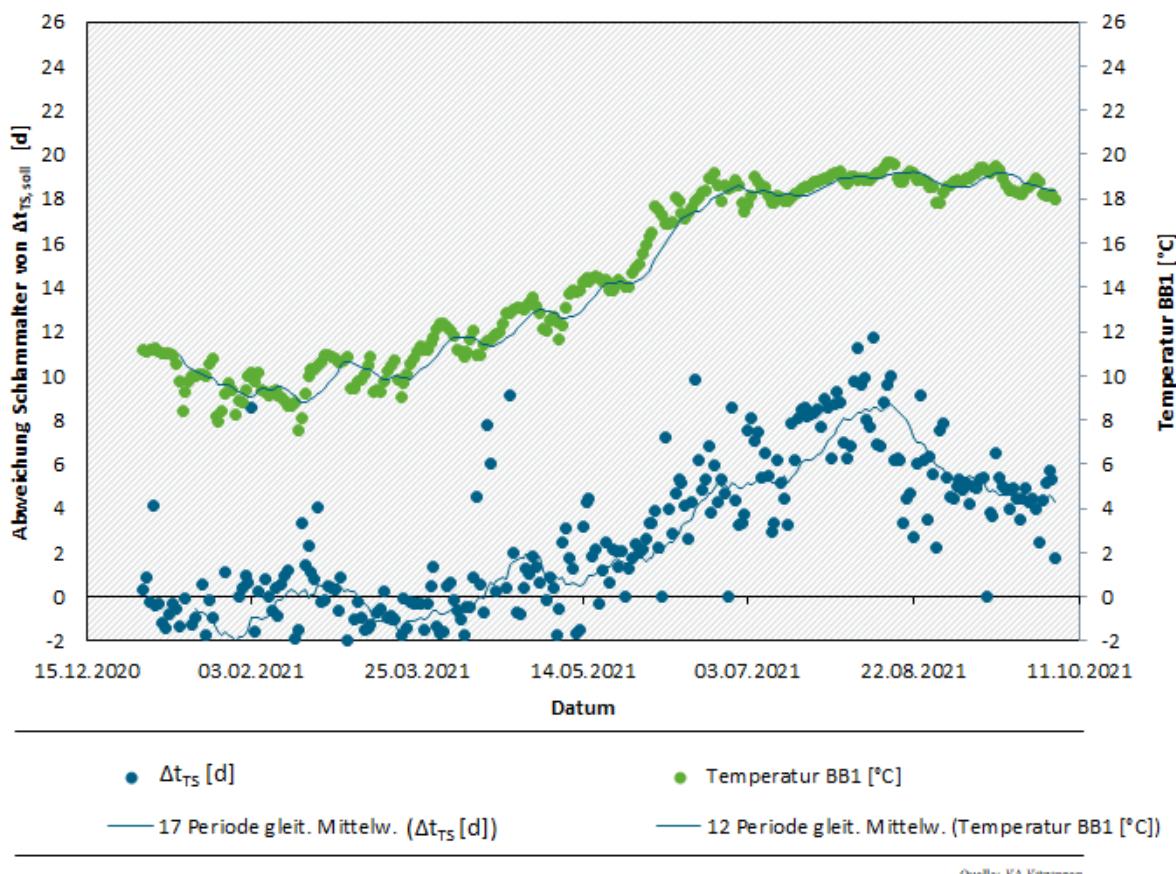
Abbildung 36: Abweichungskennzahl Δe_{Ver} Gebläse 2 KA Asselbrunn

Quelle: KA Asselbrunn, BITControl, 2022

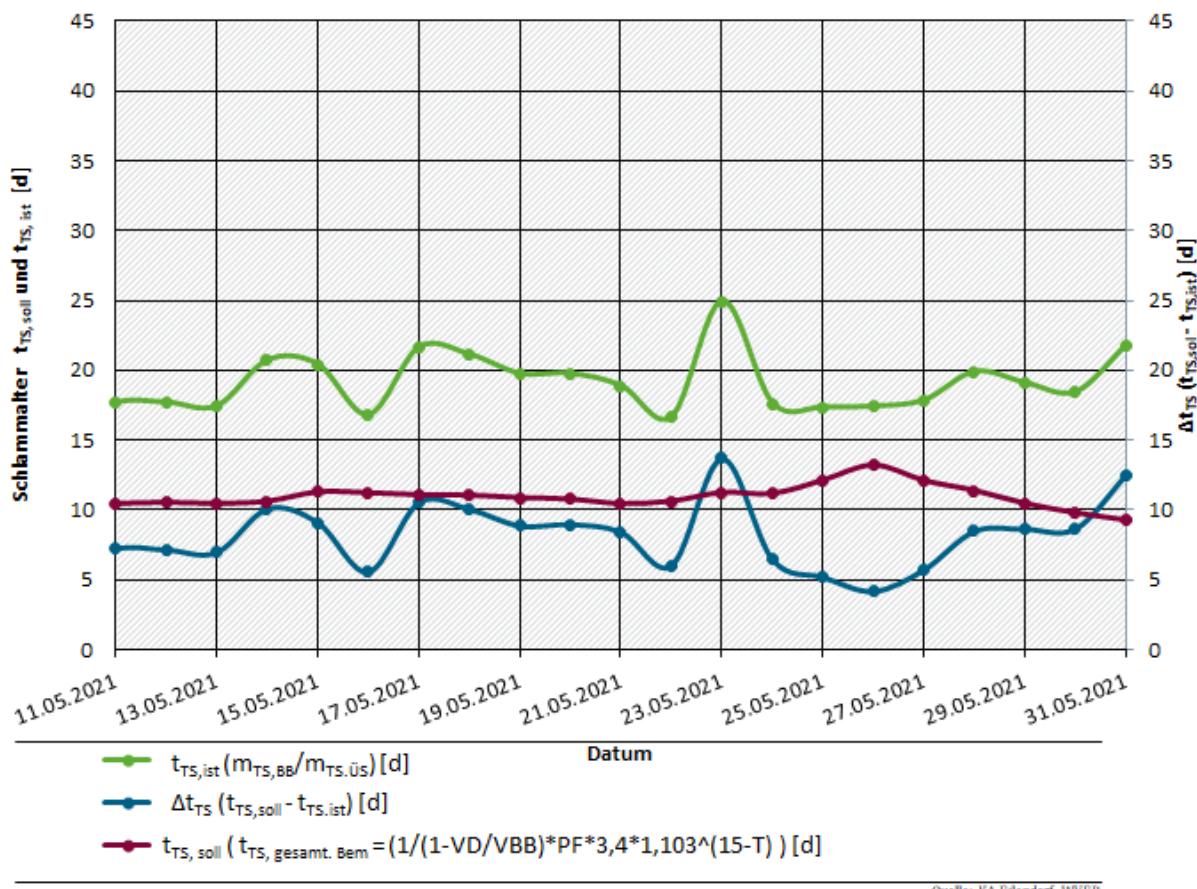
3.3.8 Abweichungskennzahl Δt_{TS}

Die Abweichungsanalyse für die Kennzahl Δt_{TS} wurde für die KA Kitzingen und KA Eilendorf untersucht. Die Streuung der Werte wurde durch das Einfügen des gleitenden Mittels für die Temperatur und die Kennzahl Δt_{TS} minimiert. In Abbildung 37 zeigt sich, dass auf der KA Kitzingen im Winter mit zu knappem Schlammalter gearbeitet wurde, während im Sommer deutliche Reserven von 6 bis 10 Tagen bestanden.

Auf der KA Eilendorf wurde beispielhaft ein Monat herausgesucht. Auch hier zeigt sich, dass deutliche Reserven bestehen (Abbildung 38). Es wurde deutlich, dass für die Betrachtung des Δt_{TS} der Betrachtungszeitraum über mehrere Tage bzw. Schlammalter gemittelt/geglättet werden sollte, um bei aktiver Nachsteuerung die notwendigen Systemreserven nicht zu stark zu verringern.

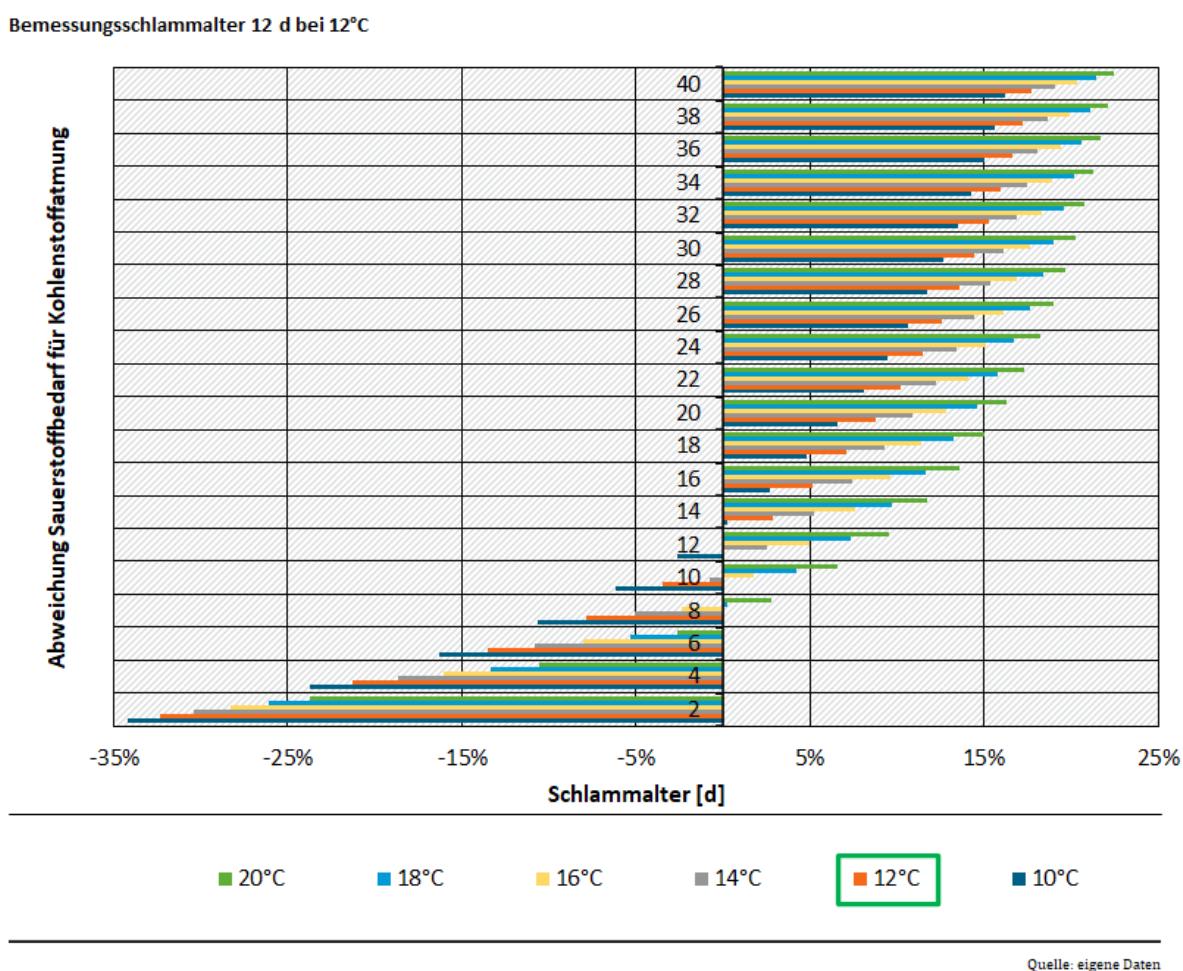
Abbildung 37: Abweichungsanalyse Δt_{TS} der KA Kitzingen

Essenziell für die korrekte Bestimmung von Δt_{TS} waren zuverlässige Messungen des abgezogenen Überschlussschlammvolumens und der Biomassekonzentration (insgesamt Schlammmasse) auf den Kläranlagen.

Abbildung 38: Abweichungskennzahl Δt_{TS} für die KA Eilendorf

Zur Abschätzung der Auswirkungen zu hoher Schlammalter wurden modellhaft Berechnungen vorgenommen. In Abbildung 39 wurden anhand des Formelwerkes aus dem DWA Arbeitsblatt A 131 die Abweichungen für den Sauerstoffbedarf durch den Kohlenstoffabbau in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Schlammalter dargestellt. Als Bezugspunkt (Nullwert) dienen die Temperatur 12° C und ein Gesamtsschlammalter von 12 Tagen. Dabei wurde ein Bereich für t_{TS} bis 30 d abgebildet, der in der Praxis durchaus anzutreffen ist. In der Abbildung 39 wird deutlich, dass insbesondere bei hohen Temperaturen (20° C) und hohen Schlammaltern (>20d) eine Vergrößerung des Sauerstoffbedarfs für die Kohlenstoffatmung um ca. 15 bis 20 % theoretisch abgebildet werden kann. Der Temperatureinfluss fällt dabei sehr deutlich aus.

Abbildung 39: Relative Abweichung des Sauerstoffverbrauchs für die Kohlenstoffatmung in Abhängigkeit von T und t_{TS}

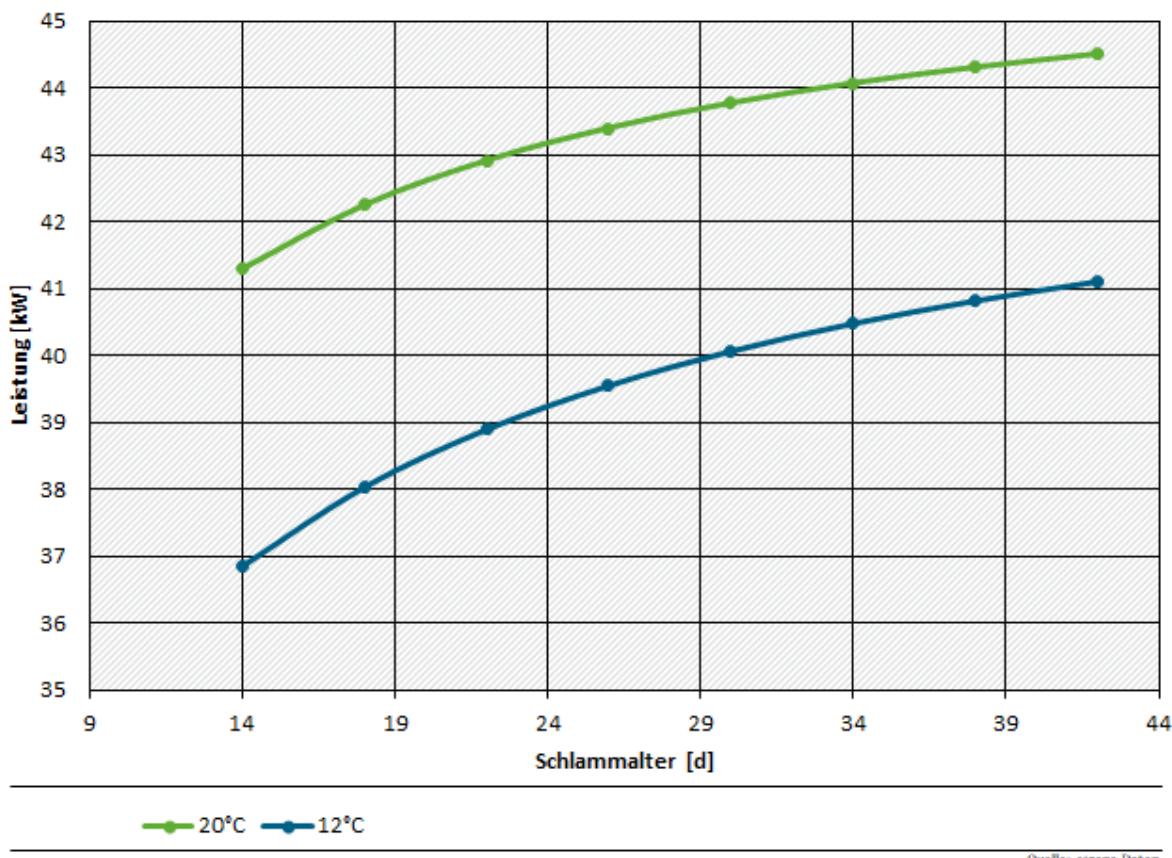


In der Praxis haben der Sauerstoffrückgewinn durch die Denitrifikation sowie die Sollwertvorgaben für die Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken einen weiteren signifikanten Einfluss. Dieser Zusammenhang wurde in Abbildung 40 dargestellt, wobei relativ günstige Randbedingungen für das Belüftungssystem und den α -Wert ($\alpha = 0,8$) gewählt wurden. In Abbildung 40 wird zunächst der deutliche Unterschied in Abhängigkeit von der Temperatur sichtbar, jedoch auch der Einfluss des Schlammalters. Die dargestellte Temperaturbandbreite von 12 bis 20°C repräsentiert den sehr häufig vorkommenden Abwassertemperaturbereich.

Abbildung 40 zeigt, dass bei einem Schlammalter von 26 d, im Vergleich zu einem Bemessungsschlammalter von 12 d sowie 12°C Abwassertemperatur die notwendige Gebläseleistung um rund 7 % (ca. 3 kW) höher liegt. Bei Hochrechnung auf 4.000 Bh (Dauerläufer) bedeutet ein zu hohes Schlammalter von 10 d in der warmen Jahreszeit für dieses Beispiel ein Mehrverbrauch von ca. 12.000 kWh bzw. ein entsprechendes Einsparpotenzial bei korrekter Einstellung des notwendigen Schlammalters. Damit wird auch der Nebeneffekt einer geringen Gasausbeute bei zu hohem Schlammalter gemindert.

Die Abweichungsanalyse Δt_{TS} kann als sehr nützlich eingeschätzt werden, da hier erhebliche Potenziale für ein optimiertes Schlamm-Management, für einen geringeren notwendigen Lufteintrag in die Belebungsbecken und ggf. höhere Energiegehalte im Überschuss-Schlamm erschlossen werden können. Zugleich können darüber auch ggf. zu knappe Schlammalter identifiziert und damit Ablaufverschlechterungen (Nitrifikation) vermieden werden.

Abbildung 40: Abschätzung Gebläseleistung für eine Kläranlage von 40.000 E, Vorklärung >1 h, sehr effiziente Belüfter ($SSOTR = 18 \text{ g}/(\text{Nm}^3 * \text{m})$), α -Wert = 0,8, $c_x = 2 \text{ mg/l}$, Mittelwertbetrachtung ohne Stoßfaktoren.



Quelle: eigene Daten

3.3.9 Wärmekennzahlen

Zur adäquaten Überprüfung der entwickelten Wärmekennzahlen auf Praxisanlagen im Rahmen des AP 3 bestand noch erheblicher Nachholbedarf an messtechnischer Ausrüstung, um die entwickelten Kennzahlen plausibel bestimmen zu können. Allein die Beschäftigung mit dem Thema Wärmekennzahlen führte auf den Kläranlagen bereits zu einer Sensibilisierung für das Thema Wärme und zu z. T. innovativen Maßnahmen zu Bedarfsminderung bzw. Optimierung der Deckung durch eigene Ressourcen bspw. auf der KA Aachen-Eilendorf. So konnte dort durch Einfügen von Wartezeiten vor der Anforderung „Brennerzuschaltung“ dessen Betrieb sehr stark reduziert werden. Hier wurde deutlich, dass teilweise geringe Schwankungen oder knappe Hysteresen zu unnötigen Zuschaltungen des Brenners führten. Auch die Absenkung der zulässigen Faulraum-Temperatur um ein halbes Grad bzw. um ein Grad in der kalten Jahreszeit minderte den Wärmebedarf in Verbindung mit der o. g. Maßnahme soweit, dass im Winter 2021/2022 nahezu kein Heizöl gebraucht wurde (KA Eilendorf, 2021).

Schon die Kenntnis und die folgende Integration der verschiedenen Wärmebedarfswerte abseits der Kennzahlenbildung in ein Energiemanagementsystem erlaubte dem Personal, (teil-) automatisiert auch eine Optimierung der Wärmeversorgung vorzunehmen. Hier ist noch erhebliches Ausbaupotenzial vorhanden. An erster Stelle stehen dabei die Minderung bzw. vollständige Vermeidung des Zufeuerns fossiler Brennstoffe zur Wärmeversorgung, die auf Kläranlagen insbesondere im Mittelgebirge durchaus einige tausend Liter Heizöl/Jahr ausmachen können. So wurden aktuell in 2022 auf den Kölner KA-Weiden und KA-Rodenkirchen der Einsatz von Heizöl

stark reduziert und ebenfalls die Fackelverluste gegenüber 2020/2021 (KA Köln-Weiden, 2021). Wenn beispielhaft angenommen wird, dass 200 Kläranlagen bundesweit jährlich 2.000 l Heizöl nicht benötigen, wären das 400 m³/a bzw. überschlägig ca. 400 MWh/a Einsparung an thermischer (chemischer) Energie.

Interessante Ergebnisse erbrachten auf der KA Kitzingen die Kennzahlen zum Notkühler. Diese zeigten z. T. große Wärmeüberschüsse auf und konnten zusammen mit dem momentanen Eigenversorgungsgrad bzgl. Strom weiter in das Energiemanagement eingebunden werden, insbesondere mit dem Ziel der Optimierung der Eigenbedarfsdeckung bzgl. Strom. Für die Wärmeüberschüsse soll noch eine Lösung gefunden werden (KA Kitzingen, 2021).

Auf der KA Eilendorf wurden ebenfalls Wärmekennwerte ermittelt, jedoch noch keine spezifischen Kennzahlen gemäß der hier vorgestellten. Anhand der ermittelten Daten wurde jedoch bereits eine Integration dieser Wärmedaten in ein selbst entwickeltes Regelungssystem vorgenommen mit dem Ziel, den Fremdenegiebezug (Heizöl) für Wärme zu minimieren. Dies bewährte sich im Winter 2021/2022, wo der Fremdenergiebezug (Heizöl) faktisch auf null gesenkt werden konnte. Weitere Optimierungsansätze deuteten sich an und könnten präzisiert werden (KA Eilendorf 2021).

Eine Verknüpfung zwischen Strom- und Wärmekennwerten erfolgt ebenfalls auf der KA Aachen-Eilendorf. Dort wurde eine bedarfsabhängige Steuerung der Umwälzpumpen für die unterschiedlichen Heizkreisläufe realisiert. Zeiten mit geringerem Wärmebedarf haben dann zumindest im Wärmeverteilungssystem deutlich niedrigere Stromverbräuche zur Folge (KA Eilendorf 2021).

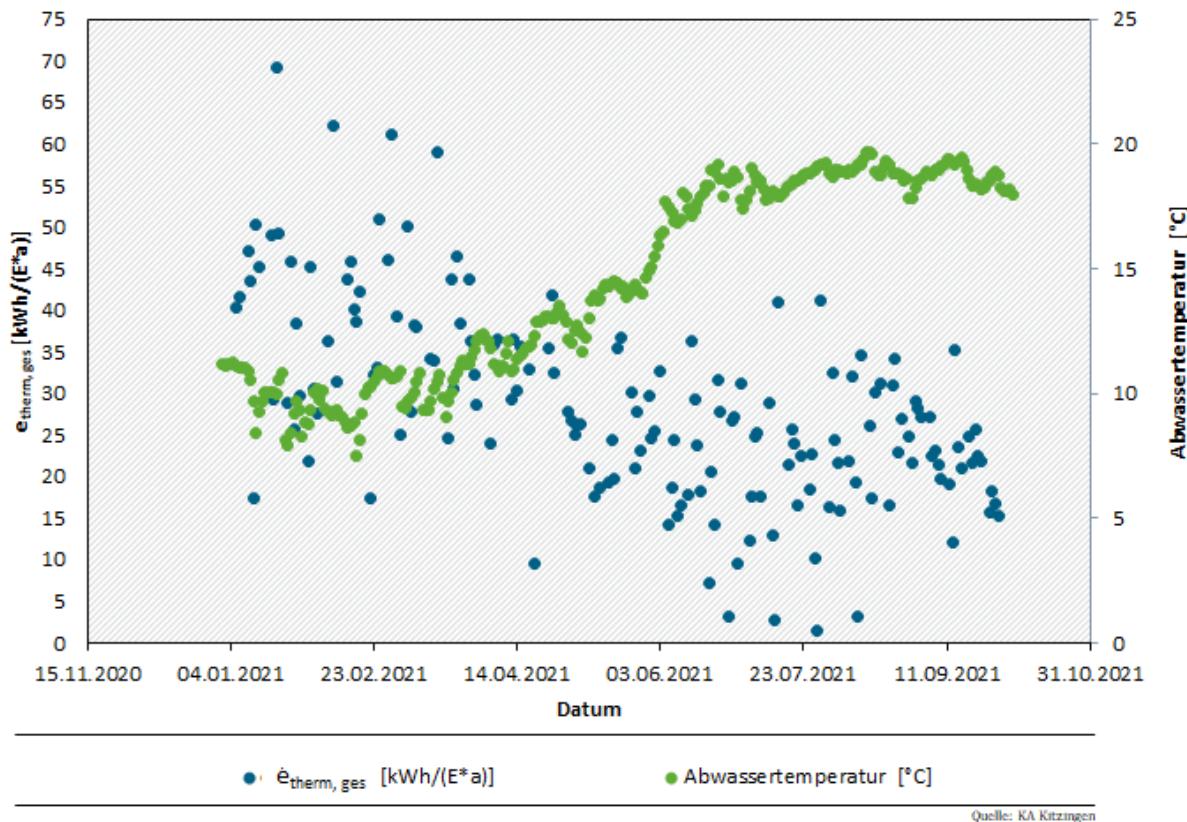
3.3.10 Wärmekennzahl $e_{therm,ges}$

In diesem Diagramm wird die Kennzahl spezifischer Gesamtwärmebedarf in Abhängigkeit von der Temperatur für die KA Kitzingen dargestellt.

Die erste Wärmekennzahl $e_{therm,ges}$, die den gesamten Wärmebedarf der KA repräsentiert, wurde auf der KA Kitzingen als Tageswert in kWh/(E·d) aufgenommen. Für die Vergleichbarkeit mit der bisher als Jahreswert definierten Kennzahl e_{ext} machte es Sinn, den Tageswert dieser Kennzahl als Jahreswert in kWh/(E·a) umzuformen. Die Abbildung 41 zeigt die große Streubreite aber auch den Jahresgang, der insbesondere von der Abwassertemperatur abhängig war. Dies wird wiederum maßgeblich durch die Wärme zur Schlammaufheizung beeinflusst.

Die große Streubreite der Tageswerte in jeder Jahreszeit war ggf. auch ein Signal, dass hier die Messtechnik und Datenerfassung noch genauer angeschaut werden sollte. Dies betrifft die Temperurmessungen, insbesondere die tatsächlich erwärmten Schlammmengen, den Einfluss ggf. vorhandener Rekuperatoren und deren Betriebszeit sowie auch die Wärmemengenmessungen im Heizmedium. Eine gewisse Mittelung der Werte z. B. über eine Woche könnte den erwarteten Zusammenhang ggf. deutlicher hervortreten lassen. In weiteren Forschungsprojekten sollte eine mehrdimensionale Betrachtung verschiedener Einflussgrößen erfolgen, da die Schwankungsbreite bei höheren Temperaturen zeigt, dass die Außentemperatur nicht allein für den Wärmebedarf verantwortlich ist.

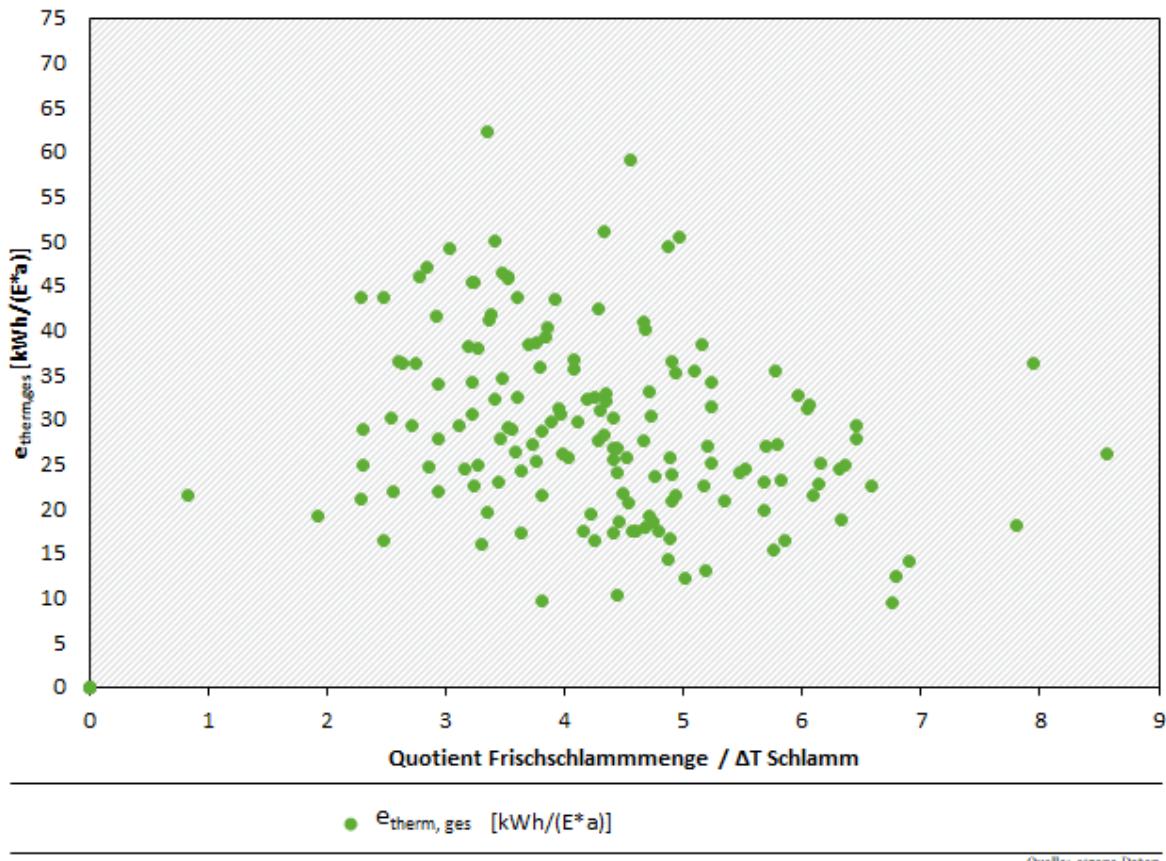
Für den gesamten Wärmebedarf der KA Kitzingen wurde ein Jahresmittelwert von 28,7 kWh/(E·a) errechnet. Damit wurde erstmals auch eine Betrachtung dieser Kennzahl über ein ganzes Jahr vorgenommen. Der Wert von knapp 29 kWh/(E·a) entspricht in der Größenordnung etwa dem elektrischen Energieverbrauch vieler mittelgroßer Kläranlagen und zeigt, dass Strom und Gesamtwärmebedarf in ähnlicher Größenordnung zumindest wie bei Anlagen mit Faulung liegen.

Abbildung 41: Kennzahl $e_{\text{therm, ges}}$ KA Kitzingen in Abhängigkeit der Abwassertemperatur

Quelle: KA Kitzingen

Es wurde versucht, den Zusammenhang zwischen Gesamtwärmebedarf, zu erwärmendes Rohschlammvolumen und der Temperaturdifferenz (ΔT) noch deutlicher herauszuarbeiten und als Bezugsgröße der Quotient aus Frischschlammmenge und dem notwendigen ΔT zur Schlammaufheizung gebildet (Abbildung 42). Ein genereller Trend ist erkennbar, der zeigt, dass mit geringerem ΔT zur Schlammaufheizung der Gesamtwärmebedarf abnimmt, allerdings nicht so deutlich, wie erwartet.

Abbildung 42: Gesamtwärmebedarf $e_{\text{therm,ges}}$ in Abhängigkeit vom Rohschlammvolumen und T_{Abwasser}



Quelle: eigene Daten

Die Kennzahl $e_{\text{therm,ges}}$ erweist sich sinnvoll als Ausgangspunkt für die Positionsbestimmung, für weitere Analysen und Optimierungen im Bereich Wärme auf der KA.

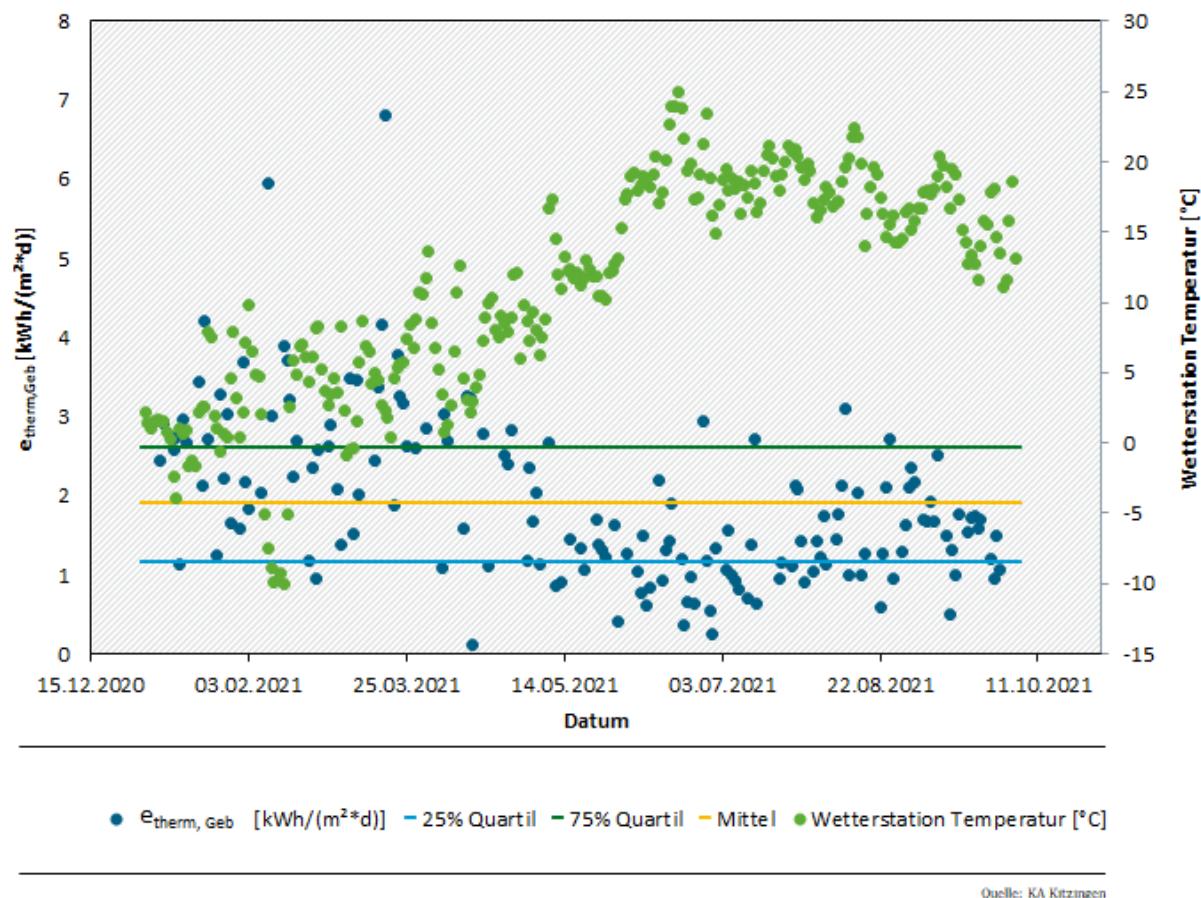
3.3.11 Wärmekennzahl $e_{\text{therm,Geb.}}$.

Mit der Kennzahl $e_{\text{therm,Geb.}}$ soll der Wärmebedarf für die beheizte Gebäudefläche ermittelt werden. Darin ist zumeist auch die Wärme für Duschen und sonstiges Warmwasser neben der Schlammaufheizung enthalten.

Diese Kennzahl orientiert sich damit stark am spezifischen Wärmebedarf für Wohn- und Bürogebäude. Naturgemäß sind dabei große Unterschiede zu erwarten, je nach tatsächlich beheizter Gebäudefläche inkl. ggf. Werkstätten, Garagen etc., die insbesondere auf größeren Kläranlagen vorhanden sind. Auch die Lufttemperatur spielt dabei eine große Rolle. Als Jahresmittel wurde für die KA Kitzingen ein Wert von 217 kWh/m² bestimmt, der vergleichbar ist mit nicht gedämmten Altbauten bzw. Bürogebäuden.

Eine andere Darstellung der Kennzahl $e_{\text{therm,Geb.}}$ bezieht diesen Wert auf einen Einwohnergleichwert (Abbildung 43). Damit ist eine Relation zu $e_{\text{therm,ges}}$ möglich. Für die KA Kitzingen wurde ein Wert von 1,91 kWh/(E·a) ermittelt. Damit macht der Anteil der Wärme für die Gebäudeheizung nur etwa 6,7 % des gesamten Wärmebedarfs der KA aus.

Die Kennzahl $e_{\text{therm,Geb.}}$ (Abbildung 43) erschien zwar sinnvoll als Ausgangspunkt für die Positionsbestimmung sowie für weitere Analysen und Optimierungen, jedoch sind hier je nach individueller Ausstattung der Gebäude sehr unterschiedliche Werte zu erwarten.

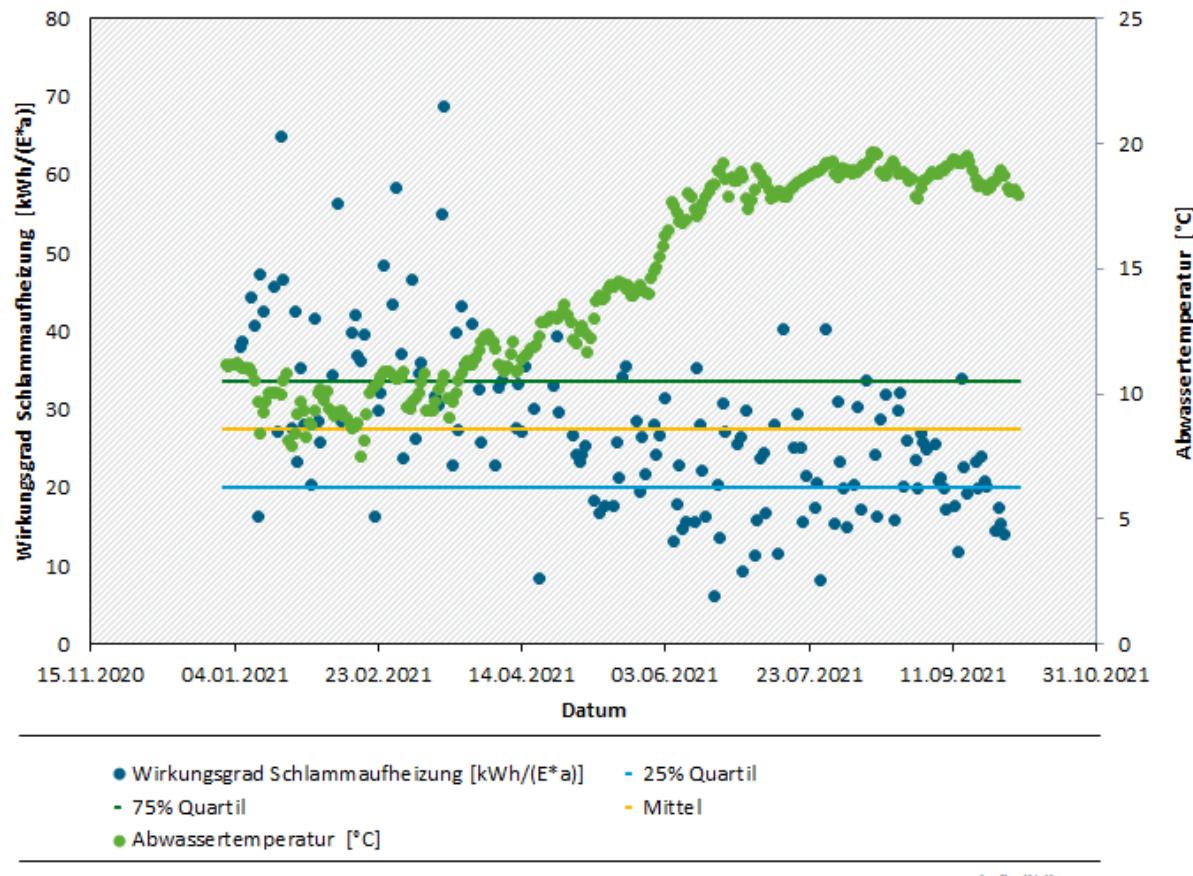
Abbildung 43: Kennzahl $e_{\text{therm,Geb}}$ der KA Kitzingen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur

3.3.12 Wärmekennzahl spezifischer Wärmebedarf Faulbehälter $e_{\text{th,FB}}$

Die Kennzahl $e_{\text{th,FB}}$ sollte genauere Informationen zum Wärmebedarf für die Schlammaufheizung incl. Abstrahlungsverluste geben. Hierbei wurde die benötigte Wärme zunächst auf den Einwohner bezogen (Abbildung 44). Für die KA Kitzingen konnte erwartungsgemäß ein deutlicher Zusammenhang zur Abwassertemperatur gezeigt werden, jedoch liegt die Schwankungsbreite besonders im Winter recht hoch. Hier sind ebenfalls die Randbedingungen und die Messwerterfassung genauer zu prüfen wie z. B. die tatsächlich eingespeiste Rohschlammmenge, die Anordnung der Wärmemengenzähler bzw. deren Datenverarbeitung.

Der Wärmebedarf Faulbehälter stellt erwartungsgemäß den größten Anteil des gesamten Wärmebedarfes einer kommunalen Kläranlage. Für die KA Kitzingen wurde ein Wert von i.M. 26,6 $\text{kWh}/(\text{E} \cdot \text{a})$ ermittelt, was etwa 92 % des gesamten Wärmebedarfes der Kläranlage ausmacht. Der Wärmebedarf Faulbehälter liegt somit in ähnlicher Größenordnung wie der gesamte elektrische Energiebedarf einer Kläranlage.

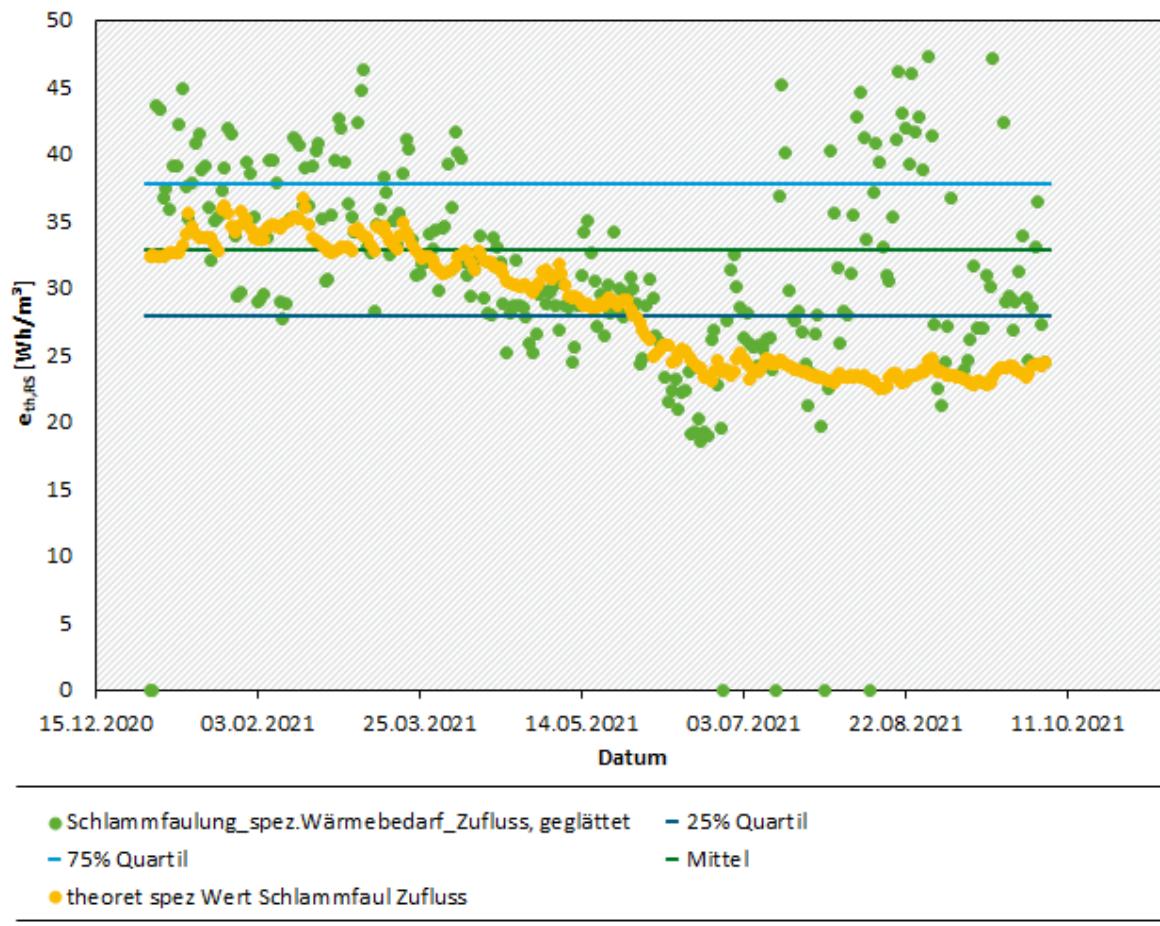
Bzgl. Messwerterfassung und Datengenauigkeit gilt für die Kennzahl $e_{\text{th,FB}}$ prinzipiell das selbe wie für $e_{\text{therm,ges}}$. Die Kennzahl $e_{\text{th,FB}}$ erscheint sinnvoll als Ausgangspunkt für die Positionsbestimmung und für weitere Analysen und Optimierungen, dabei speziell der Bezug auf die zu erwärmende Schlammmenge.

Abbildung 44: Kennzahl $e_{th,FB}$ KA Kitzingen

Quelle: KA Kitzingen

3.3.13 Wärmekennzahl spezifische Wärme Rohschlammerwärmung $e_{th,RS}$

Die Kennzahl $e_{th,RS}$ gibt Informationen über die Energie, bezogen auf die zu erwärmende Rohschlammmenge (Abbildung 45). Hier ergaben sich Probleme bzgl. Plausibilität der Messwerte. Die Trägheit der Messwertaufnehmer (Wärmemengenzähler) schienen sich deutlich auf die Ergebnisse auszuwirken, worauf die breite Streuung der gemessenen Werte in Relation zu den theoretischen Werten hindeutet. Z. T. liegen die gemessenen Werte unter den theoretischen Werten, zeitweise überstiegen jedoch die praktisch gemessenen Werte die theoretischen um ca. 100 %.

Abbildung 45: Kennzahl $e_{th,RS}$ der KA Kitzingen

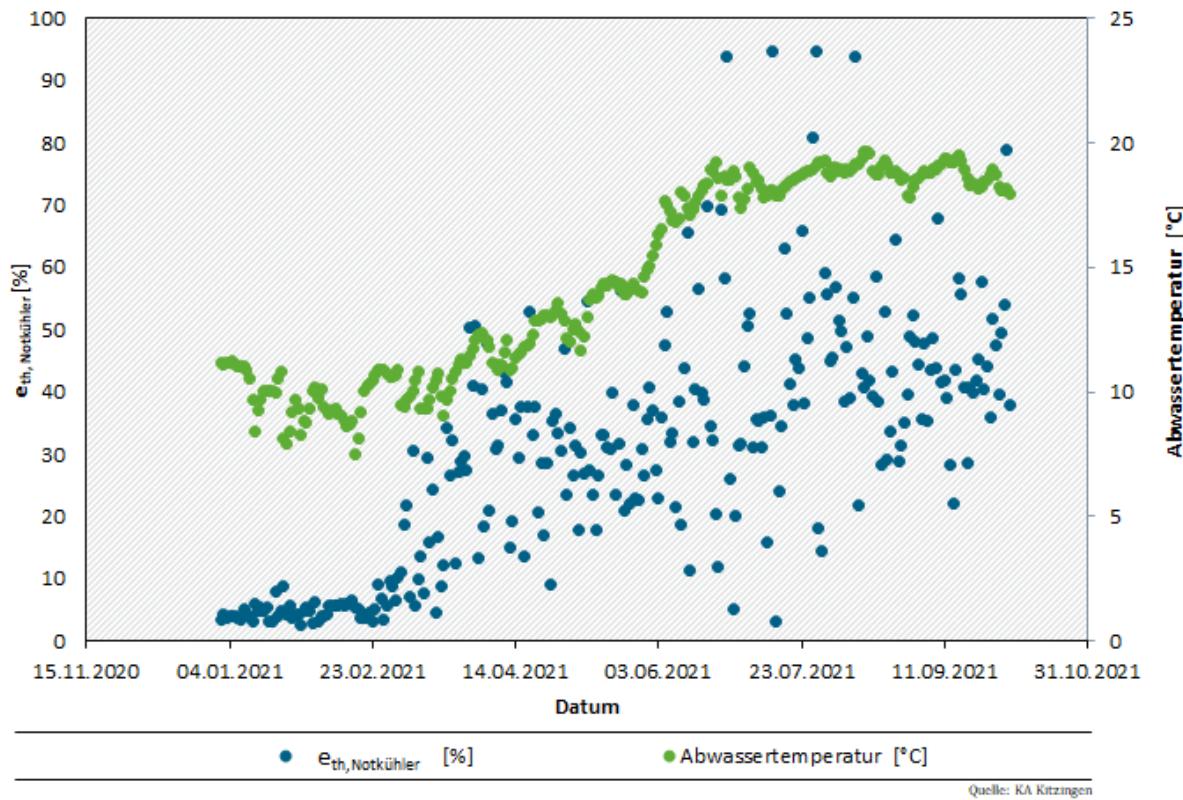
Quelle: KA Kitzingen

Die Kennzahl $e_{th,RS}$ erschien dennoch sinnvoll als Ausgangspunkt für die Positionsbestimmung bzgl. der Effizienz der Rohschlammerwärmung und für weitere Analysen und Optimierungen. Hier sollte versucht werden, die Messwerterfassung soweit zu optimieren, dass die Ergebnisse realistisch und plausibel sind.

3.3.14 Wärmekennzahl $e_{th,Notkühler}$

Die Kennzahl $e_{th,Notkühler}$ sollte Infos über den Anteil Wärmemenge geben, der über den Notkühler abgegeben wird. Diese ist in Prozent bezogen auf die am BHKW freigesetzte Wärme aber auch in Relation zum eingesetzten Biogas darstellbar (Kennzahl $e_{th,Notkühler,Biog}$).

Die Kennzahl $e_{th,Notkühler}$ kennzeichnet faktisch den Anteil der nicht genutzten Wärmemenge des BHKW. In der Abbildung 46 zeigt sich, dass bereits bei Temperaturen im Abwasser von 12°C bis zu 50 % der BHKW-Wärme nicht genutzt werden konnten, an heißen Sommertagen erreicht dieser Wert bis über 90 %. Im Jahresmittel werden ca. 30 % der BHKW-Wärme weggekühl.

Abbildung 46: Wärmekennzahl $e_{th,Notkühler}$ KA Kitzingen

Bei Verwendung dieser Kennzahl muss noch beachtet werden, ob die BHKW eine Abgasbypassklappe haben, die im Sommer die Abgasabwärme am Wärmetauscher vorbei direkt in den Kamin leitet. Für das Beispiel KA Kitzingen ist für $e_{th,Notkühler}$ anzumerken, dass die KA Kitzingen eine sehr hohe Biogasproduktion aufwies, da viel Co-Substrat angenommen wurde. Die im BHKW freigesetzte Wärme wurde über Faktoren (thermischer Wirkungsgrad) des Herstellers vom Betreiber bzw. der Fa. Flowchief ermittelt.

Diese Kennzahl gab wertvolle Informationen über die Größe und den zeitlichen Verlauf noch erschließbarer Abwärmepotenziale auf der Kläranlage, die Kennzahl $e_{th,Notkühler}$ erweist sich als eine nützliche und wichtige Kennzahl.

3.3.15 Wärmekennzahl $e_{th,Notkühler,Biog}$

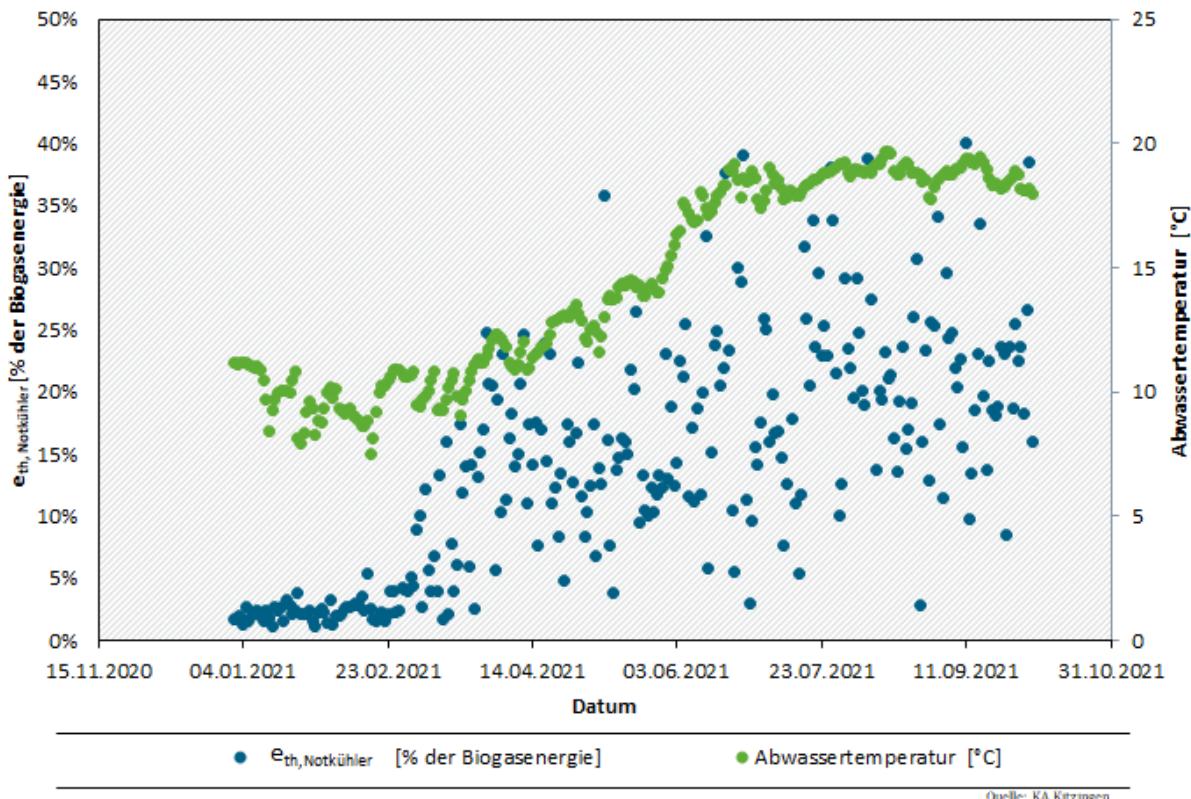
Ein weiterer Ansatz zur Ermittlung der nicht genutzten Abwärme ist der Bezug auf die eingesetzte Biogasmenge ($e_{th,Notkühle,Biog}$). Die über Notkühler abgegebene Wärme bezogen auf den Biogasinput erreicht in den Sommermonaten ca. 40 %, d. h. 2/5 der Biogasenergie werden dann auf der KA Kitzingen nicht genutzt (Abbildung 47).

Diese Abbildung zeigt den Anteil der Abwärme, die über den Notkühler abgegeben wird bezogen auf den thermischen Energieinhalt des Biogases.

In Abbildung 47 zeigt sich, dass die Anteile der über Notkühler abgegebenen Wärme immer noch hoch sind, jedoch nur etwa die Hälfte der Werte aus der Kennzahl $e_{th,Notkühler}$ ausmachen. Dies erscheint plausibel, da im BHKW selbst Verluste entstehen (Abstrahlung) und bei Kennzahl $e_{th,Notkühler}$ nur die im Kühlwasser bzw. Abgas enthaltene Abwärme gemindert um die in elektrische Energie umgeformte Energie als Bezug dient, während für die Kennzahl $e_{th,Notkühle,Biog}$ als Bezugsgröße die gesamte Biogasenergie im Input zum BHKW dient. Daher kann die $e_{th,Notkühler,Biog}$

eher zur Bewertung der Abwärmebilanzierung des Gesamtsystems Biogasverwertung herangezogen werden. Die daraus sichtbar gemachten Abwärmepotenziale können zukünftig in eigenen Anlagen z. B. für die Klärschlammertrocknung genutzt oder an externe Nutzer abgegeben werden.

Abbildung 47: Wärmekennzahl $e_{th,Notkühler, Biog}$, für die KA Kitzingen



Die genutzte Abwärme ist essenziell für die Einstufung, ob Stromsteuer gezahlt werden muss oder nicht. Hierbei liegt die Grenze bei 70 % Jahresnutzungsgrad, was auf der KA Kitzingen sicher erreicht wurde (Märtel, o.J.).

Aus den Messdaten für die Ermittlung der Kennzahl $e_{th,Notkühle,Biog}$ könnte bei kürzerem zeitlichen Bezug auch die thermische Abwärmeleistung $P_{th,Notkühler}$ errechnet werden. Diese ist eine wichtige Größe u. a. zur Dimensionierung der Wärmeübertrager zur Nutzbarmachung der Abwärme bzw. Auslegung der Systeme zur Wärmeverteilung.

Die Kennzahl $e_{th,Notkühler,Biog}$ erweist sich somit als eine nützliche und wichtige Kennzahl.

3.4 Lösungen für kontinuierliche Energieoptimierung auf Aggregatebene

3.4.1 Kontinuierliche Energieoptimierung auf Aggregatebene – Pumpen

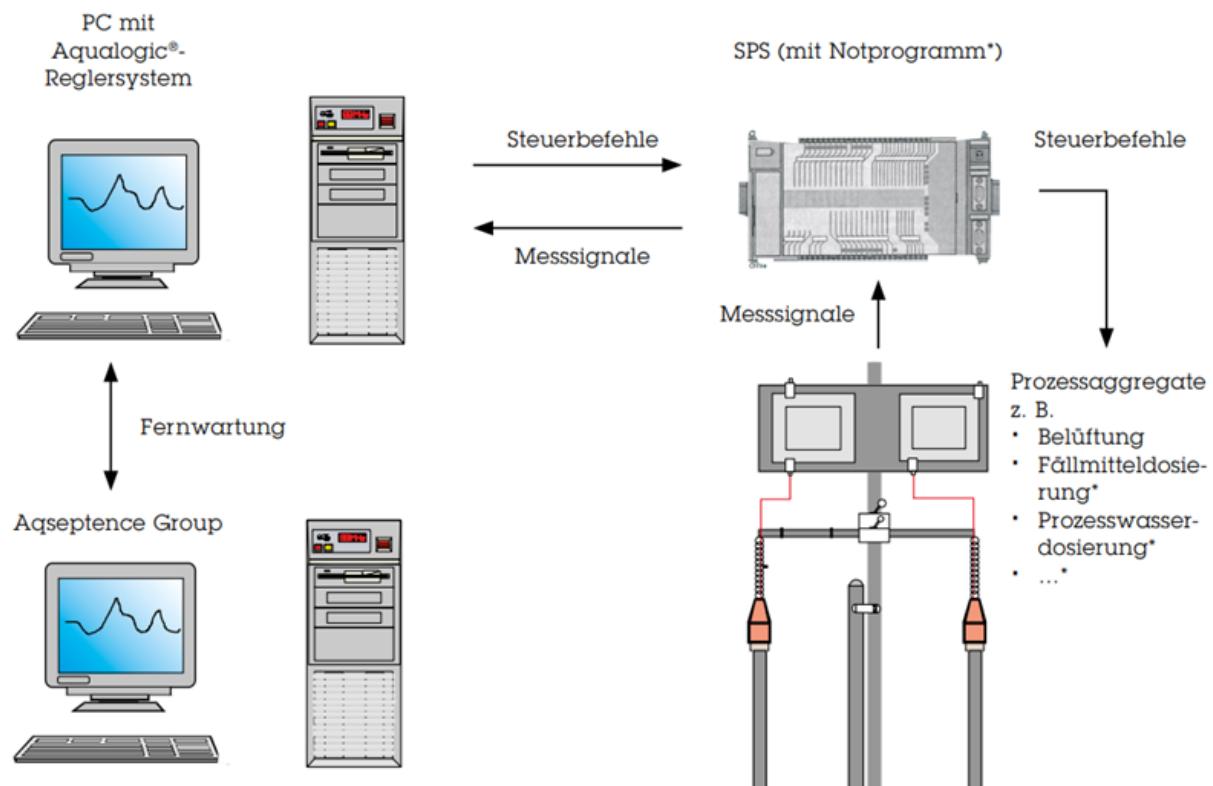
Auf Aggregatebene wurden speziell bei Pumpen Lösungen entwickelt, die bereits auf der Aggregatebene eine kontinuierliche energetische Überwachung ermöglichen. Dabei wird sogar noch ein weiterer Schritt direkt auf der Aggregatebene vollzogen – die selbsttätige Ursachenbehandlung. Beispielhaft ist dies am System Experior umgesetzt. Hier erkennen geräteintegrierte Drucksensoren untypische Veränderungen auf der Druckseite, die über geräteintegrierte oder externe Software ausgewertet werden. Kommt das Auswertesystem zu dem Schluss, dass sich eine Verzopfung aufbaut, startet die Pumpe über ihre interne FU-Steuerung eine sog. Reinigungssequenz, bei der die Pumpe versucht, den Zopf durch mehrfachen kurzen Rückwärtslauf

abzuschütteln. Zusätzlich verfügt das Aggregat über ein axial verschiebbbares Laufrad, wodurch der Querschnitt der Pumpe erweitert wird und Grobstoffe die Pumpe passieren können. Auch werden zusätzliche Pumpensumpfentleerungen vorgenommen, die zur Vermeidung von Betriebsstörungen maßgeblich beitragen. Die selbsttätige Erkennung und Beseitigung der Verzapfungen lässt die Pumpe somit im ganz überwiegenden Zeitraum ihres Betriebs in einem optimalen Wirkungsgrad laufen (Xylem 2021).

3.4.2 Kontinuierliche Energieoptimierung auf Aggregatebene – Fuzzy Logic Steuerung

Fuzzy Logic Reglersystem bietet eine weitere Möglichkeit zur Prozessregelung in der biologischen Reinigungsstufe von Kläranlagen u. a. mit dem Ziel der Energieeinsparung (Abbildung 48). Sie arbeiten i. d. R. unterhalb der Prozessregelebene der KA. Kennzeichen der Fuzzy Logic – Systeme ist deren Lernen anhand sehr vieler Praxissituationen/Betriebszustände ohne die genauen physikalisch-chemisch-biologischen Zusammenhänge in expliziten Formeln erfassen zu müssen. Durch Verwendung von Fuzzy Logic ist es dem Regler möglich, viele verschiedene Informationen parallel auszuwerten und zu interpretieren. Es liegen unterschiedliche zumeist positive Erfahrungen mit solchen Systemen vor, die bereits seit einigen Jahren auf dem Markt sind.

Abbildung 48: Schema Fuzzy-Logic-Steuerung am Beispiel des Systems der Fa. Aqseptence



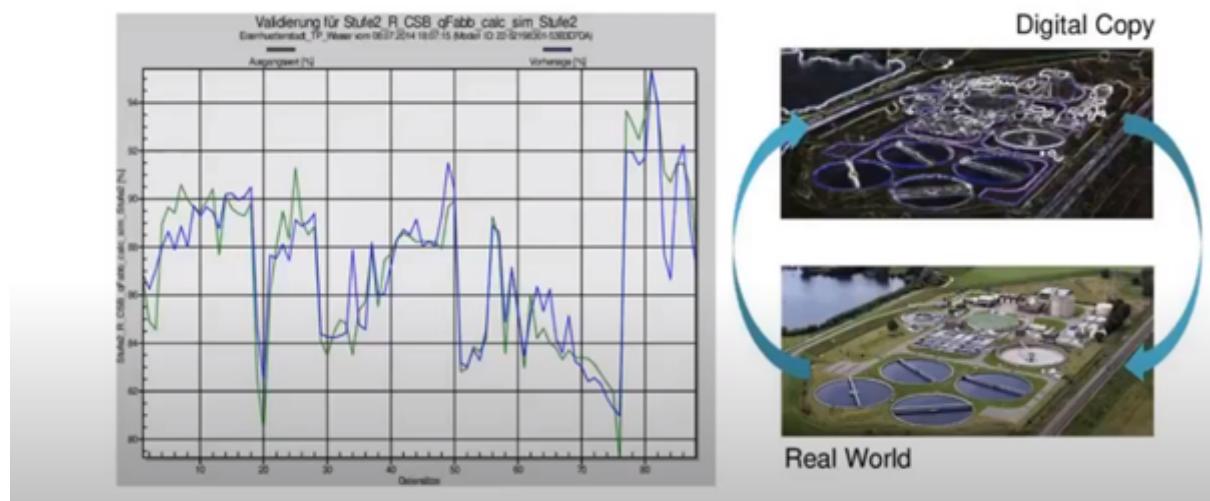
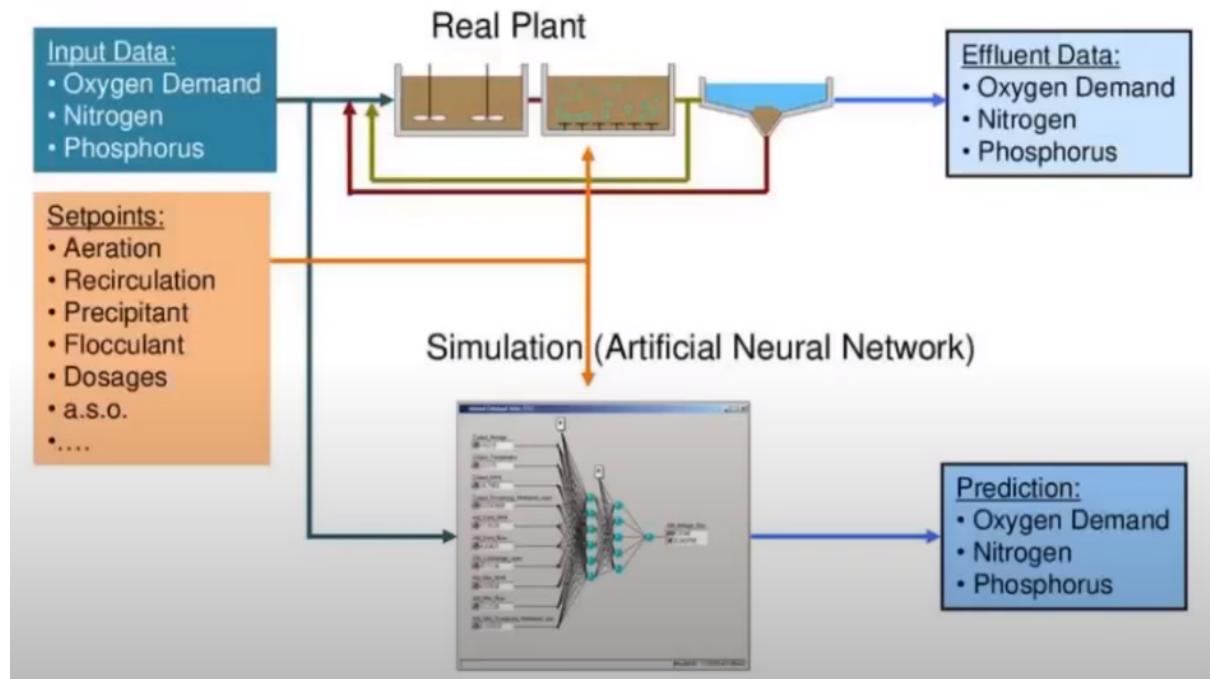
(Quelle: Aqseptence group, 2017)

3.4.3 Kontinuierliche Energieoptimierung auf Aggregatebene – digitaler Zwilling

Eine weitere Möglichkeit zur kontinuierlichen energetischen Optimierung ist die Nutzung eines sog. digitalen Zwillinges (Abbildung 49). Der „digitale Zwilling“ der Anlage wird durch Kombination aus historischen Daten, Echtzeitdaten, Wetterdaten und weiteren relevanten Daten gebildet.

Dadurch können dann in einer Echtzeitsimulation die Betriebsbedingungen genau bestimmt und die optimalen Einstellungen für einen effizienten Betriebsablauf ermittelt werden.

Abbildung 49: Schema digitaler Zwilling



(Quelle: Xylem, 2021)

3.5 Schwierigkeiten und Probleme

In diesem Kapitel werden Erkenntnisse hinsichtlich Schwierigkeiten und Problemen dargestellt, die während der Bearbeitungszeit von AP 3 und 4 deutlich wurden.

3.5.1 Sicherheitsrisiken bei Softwaresystemen

Bereits existierende, web-basierte Softwaresysteme weisen gewisse Risiken auf, die im Rahmen des Projektes jedoch noch nicht vertieft diskutiert werden konnten. Für eine spätere Umsetzung

einer dynamischen Energieanalyse bzw. Energiechecks musste dieses Thema jedoch betrachtet werden. Dies wurde im Laufe des ersten Workshops am 02.06.2021 deutlich.

3.5.2 Messgenauigkeiten und Plausibilitäten

Bzgl. Messgenauigkeiten bei Stromzählern (Strom, Leistung) insbesondere bei Motoren, die mit FU angesteuert werden, finden sich nicht immer plausible Angaben. Generell gilt jedoch, dass moderne Geräte insbesondere auch FU nur geringe Fehler aufweisen bzw. der Eigenverlust der FU für die wesentlichen Informationen und Steuerungsaufgaben sowie das Erkennen von maßgeblichen Abweichungen von Plan- oder Idealzustand nur wenig ins Gewicht fallen.

Probleme bzgl. der Plausibilität insbesondere dann, wenn Bilanzen aufgestellt wurden, konnten bei den Wärmemengen und Wärmekennzahlen (Schlammaufheizung) festgestellt werden. Hier sind die Trägheit der Messgeräte, die Trägheit der Systeme (Zeit bis zur Aufheizung bzw. Abkühlung der Rohrleitung und des darin befindlichen Mediums), Einbauorte der Messungen und evtl. Messfehler auch der Volumenstrommesser zu prüfen bzw. zu berücksichtigen.

Druckmessungen wurden DWA-Arbeitsgruppe KEK 7.3 als sehr zuverlässig eingestuft.

Bzgl. der Abweichungskennzahl Δt_{TS} waren zuverlässige Messungen des abgezogenen Überschluss-Schlammvolumens und der Biomassekonzentration im Überschuss-Schlamm (insgesamt Schlamm-Masse) auf den Kläranlagen essenziell. Bei der Berechnung des Sollschlammalters flossen die Prozessfaktoren ein und die Aufteilung erfolgte in anoxisch/aeroben Volumen bzw. Reaktionszeit. Viele Kläranlagen arbeiten mit variablen Zonen/Zeiten. Für die Potenzialabschätzung wurde nach Diskussion der Experten ein mittlerer Wert bestimmt, hier muss ggf. nach Sommer- bzw. Winterhalbjahr unterschieden werden, was für die Zonen-/Zeiteinteilung als ausreichend angesehen werden kann.

3.6 Aussichten zur wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Verwertung der Forschungsergebnisse

Bereits jetzt zeigt sich, dass einige der weiter- bzw. neu entwickelten Kennzahlen einen praktischen Nutzen haben können. Die Integration insbesondere von Kennwerten wie e_{PW} bzw. Δe_{PW} erschien mit sehr vertretbarem Aufwand machbar und lieferte verlässliche Aussagen. Die Online-Visualisierung kann auf verschiedenen Wegen erfolgen.

Die Visualisierung von Kennzahlen in hoher Dichte (z. B. wie bei der KA Köln-Weiden) lieferte Hinweise auf optimale und ungünstige Betriebsbereiche der Pumpen und konnte somit unmittelbar für die Optimierung der Pumpwerkssteuerung genutzt werden.

Aber auch die frühe Erkennung von sich anbahnenden Verstopfungen/Verzopfungen wurde praktisch erwiesen und kann ebenfalls im Sinne der vorbeugenden Instandhaltung und des energetisch optimalen Betriebs genutzt werden.

Die Kopplung von Kennzahlen an ein Energiemanagementsystem auf den Kläranlage ist sehr naheliegend, wird z. T. schon realisiert und verspricht unmittelbaren praktischen Nutzen mit Blick auf einen kontinuierlichen energetisch günstigen Betrieb der Kläranlagen. Hier verschneiden sich Aspekte der Energieanalyse nach DWA-A216 mit der unmittelbaren Wirksamkeit der Ergebnisse aus der kontinuierlichen Energieanalyse mit der kontinuierlichen Betriebsoptimierung der Kläranlagen.

Auf Aggregatebene sind erste „intelligente“ Systeme im Einsatz, die insbesondere durch integrierte Sensoren und Reinigungsmechanismen (Pumpen) einen Betrieb erlauben, bei dem Zeiträume mit ungünstigem Wirkungsgrad sehr stark verkürzt werden und vor allem die Wartungs-

intensität stark abnimmt. Dies hat indirekt auch einen sichtbaren Nutzen für Energie und Umwelt, wenn deutlich weniger Entstöreinsätze insbesondere zu Pumpwerken außerhalb der KA gefahren werden müssen.

Insgesamt wurde aus diesen ersten Untersuchungen aber auch sichtbar, dass die Zahlenbasis für den erzielbaren Nutzen noch relativ schmal ist. Hier gilt es, Erfahrungen auf weiteren KA zu sammeln. Dies gilt speziell auch für die Ermittlung/Aufzeichnung des langfristigen Verschleißverhaltens von verschiedenen Pumpentypen und damit auch der Definition von Wartungs- und Instandsetzung intervallen. Hier sind längere Zeiträume als ein Jahr für ein Monitoring notwendig.

Die Aussagekraft einiger Kennzahlen, z. B. e_{Bel} , ist durch Überlagerung vieler Einflussfaktoren noch begrenzt.

Die Integration der Methodik und wesentlicher Elemente aus dem Vorhaben in das Arbeitsblatt DWA-A 216 ist vorgesehen und wird von der DWA-Arbeitsgruppe KEK 7.3 aktiv aufgenommen.

Die beteiligten Praxispartner BITControl und FlowChief werden in ihren Softwareprodukten Elemente und Kennzahlen aus dem Vorhaben integrieren und auf interessierten Kläranlagen implementieren. Die Implementierung einiger Kennzahnberechnungen und insbesondere die Sichtbarmachung der Basisgrößen für die Kennzahnberechnung ist bereits in diesem Vorhaben erfolgt.

Auf den beteiligten Partner-Kläranlagen (KA Eilendorf) werden die bereits implementierten Ansätze weiter vervollständigt und an die lokalen Bedingungen angepasst.

4 Fazit

4.1 Empfehlungen für eine dynamische Energieanalyse und technische Randbedingungen

4.1.1 Geeignete Parameter und empfohlene Kennzahlen für eine dynamisierte Energieanalyse

Eine dynamische und kontinuierliche Erfassung des energetischen Zustands von Kläranlagen erfordert zusätzliche Messgrößen und Parameter. Dies betrifft zunächst physikalisch-chemische Parameter, die im Prozess bzw. an ausgewählten Aggregaten gewonnen werden (müssen), weiterhin zusätzliche Messgrößen zur Erfassung der eingesetzten bzw. erzeugten thermischen Energie sowie zusätzliche Messstellen für elektrische Leistung/elektrische Arbeit.

Die Bildung von Kennzahlen bzw. die Modifizierung nach DWA-A 216 bereits bestehender Kennzahlen für kürzere Zeiträume unterstützen das Aufzeigen des dynamischen Verhaltens, die Identifizierung von Defiziten und die energetische Optimierung insgesamt.

Als Ergebnis dieses Vorhabens werden auf Grundlage der in Tabelle 10 dargestellten Messparameter die Nutzung folgender Kennzahlen (Tabelle 11) empfohlen. Zweck und Nutzen der jeweiligen Messparameter und Kennzahlen sind in der Tabelle 11 zusammengefasst.

Folgende Empfehlungen für weitere Messgrößen und Parameter können zusammengefasst werden:

- ▶ Druckmessungen in den Druckstutzen der wichtigsten Pumpen
- ▶ Sauerstoffmessungen in jeder belüftbaren und separat steuerbaren Beckengruppe
- ▶ Volumenstrommessungen möglichst separat für jede größere Pumpe

Weitere Empfehlungen für Messgrößen für thermische Energie:

- ▶ Wärmemengen zu Faulbehälter und für Gebäude über Wärmemengenzähler
- ▶ Abwärme über Notkühler über Wärmemengenzähler
- ▶ Wärmebezug extern (Strom oder Brennstoffe)

Folgende Empfehlungen konnten für elektrische Messgrößen herausgearbeitet werden:

- ▶ Strom-/Leistungsaufnahme aller wichtigen/größeren Verbraucher (>3 bis 5 KW) auch unter Berücksichtigung der Laufzeit
- ▶ Laufzeiterfassung (Betriebsstunden) aller wichtigen/größeren Verbraucher sowie der Verbraucher, für die keine separate Strommessung installiert wird
- ▶ Strom für Wärmepumpe und/oder elektr. Heizung separat erfassen
- ▶ Leistungsmessung möglichst vor dem FU, wenn FU integrierte Leistungserfassung erfolgt, dann vorgesetzte Verluste ggf. über Faktor erfassen

Des Weiteren können Empfehlungen für den Mindestumfang energetischer Kennzahlen gegeben werden. Hierbei handelt es sich um:

- ▶ Kennzahlen (modifiziert für kürzere Zeiträume): $e_{ges,tx}$, $e_{PW,tx}$, $e_{Ver,tx}$, EV

- Abweichungskennzahlen: Δe_{PW} , Δt_{rs} ,
- Wärmekennzahlen: $EV_{Wärme}$, $e_{therm,ges}$, $e_{th,RS}$, $e_{th,Notkühler,Biog}$

Tabelle 10: Zusammenfassung notwendiger Messparameter, Zweck und Nutzen für dynamische Energieanalyse

Parameter	Einheit	Bezeichnung	Begründung Zweck und Nutzen
h	[m]	Füllstandsmessung	Überwachung Saugseite der Pumpe, wird für korrekte Ermittlung der Förderhöhe benötigt
p	[bar]	Druckmessung	Überwachung Druckseite der Pumpe, ermöglicht Rückschlüsse auf erhöhte Widerstände/ Druckverluste in Druckleitung, als Ersatzparameter zur Beurteilung der Effizienz von Hebestufen, wenn keine Volumenstrommessung möglich bzw. installiert
O_2	[mg/l]	Sauerstoffmessung	Elementar zur differenzierten Steuerung des Sauerstoffeintrags durch Druckbelüfter
Q	[m^3/s], [m^3/h], [l/s]	Volumenstrom-messung	Elementar für Überwachung/Steuerung Fördermenge und wichtige Referenzgröße für Effizienz der Pumpe
$W (Q)$	[kWh_{therm}]	Wärmemengen-zähler	Überwachung/Steuerung Wärmemengen zu den Verbrauchern, Aufnahme der Abwärme über Notkühler
B_{ext}	[kWh/a]	Externer Wärme-bezug	Aufnahme der extern zugeführten Wärmemenge (Heizöl, Gas, Strom Direktheizung, Strom für Wärmepumpe, Umrechnung in KWh/a)
Elektr. Leistung, Stromverbrauch/elektr. Arbeit	[kW], [kWh]	Elektr. Leistung, elektr. Arbeit	Leistungs-/ Stromaufnahme als Basisparameter zur Ermittlung des Stromverbrauchs (elektr. Arbeit), Erfassung der größeren Verbraucher für Optimierung und Energiemanagement, möglichst getrennte Erfassung Stromverbrauch auch für el. Heizung und Wärmepumpe, da beide nicht primär für den Prozess Abwasserreinigung notwendig sind

Tabelle 11: Zusammenfassung empfohlener Kennzahlen, Zweck und Nutzen für dynamische EA

Kennzahl	Einheit	Bezeichnung	Begründung Zweck und Nutzen
$e_{ges,tx}$	[kWh/(E·d)], [kWh/(E·a)]	Stromverbrauch gesamt	Überblick über Stromverbrauch KA gesamt, Bezug auf kürzere Zeitabschnitte, dadurch differenziertes Bild, Identifizierung Betriebsbedingungen für hohe und niedrige Werte
$e_{Bel,tx}$	[kWh/(E·a)]	Stromverbrauch Belüftung	Überblick über Stromverbrauch für gesamtes Belüftungssystem, Bezug auf kürzer Zeitabschnitte, dadurch differenzierteres Bild, auch für Oberflächenbelüfteter nutzbare Kennzahl
e_{ver}	[kWh/(m³*bar)]	Stromverbrauch Belüfteraggregate	Überblick über Stromverbrauch Verdichter (Gebläse), Bezug auf kürzer Zeitabschnitte, dadurch differenzierteres Bild, Verschleißerkennung Verdichter
EV_{tx}	[%]	Eigenversorgungsgrad Strom	Wichtige Kennzahl, Bezug auf kürzere Zeitabschnitte, ggf. Momentanwert, auch zum Energiemanagement
$EV_{Wärme}$	[%]	Eigenversorgungsgrad Wärme	Gibt Auskunft über Eigenversorgung mit Wärme
$e_{PW,tx}$	[Wh/m³*m]	Kennzahl für spezif. Stromverbrauch Pumpwerk	Gibt zeitnah Infos zum spezifischen Stromverbrauch von Pumpwerken / einzelnen Pumpen, Identifikation von sich anbahnenden Verzopfungen, Verstopfungen und Verschleiß, Identifikation von günstigen und ungünstigen Betriebsbereichen und Schaltungen
Δt_{TS}	[%, [d]]	Abweichungskennzahl für Schlammalter	Gibt zeitnah Infos zu relevanten Abweichungen zum Sollschlammalter, t_{TS} ist für Energiebedarf Belebung eine wesentliche Stellgröße
$e_{therm,ges}$	[kWh/(E·a)]	Spez. Wärmebedarf gesamt	Gibt Auskunft über Wärmebedarf der KA, wesentliche Kennzahl auch für thermische Optimierung der KA
$e_{th,RS}$	[kWh/m³]	Spez. Wärmebedarf (Roh-) Schlammaufheizung	Gibt Auskunft über Wärmebedarf zur (Roh-) Schlammaufheizung, wesentliche Kennzahl für Beurteilung der thermischen Effizienz der anaeroben Schlammbehandlung
$e_{th,Notkühler,Biog}$	[kWh/(E·a)]	Wärmemenge, die über Notkühler abgegeben wird bezogen auf eingesetzte Biogasenergie	Gibt Auskunft über den Anteil im Biogas enthaltener thermischer Energie, die über Notkühler abgegeben wird, Kennzahl für Identifizierung noch anderweitig nutzbarer (Ab-) Wärmeenergie

4.1.2 Empfehlungen zur Plausibilitätsprüfung von Daten

Neben geeigneten Parametern und Kennzahlen wurden im Rahmen des Projektes auch Messdaten geprüft. Wenn Abweichungen in Messwerten in der Größenordnung von mehreren 10 % bis über 100 % vom Vertrauensbereich vorliegen, müssen Messwerte als unplausibel eingestuft werden. Auch die Weiterverarbeitung von primären Messdaten aus Sonden bzw. aus Messgeräten im PLS und den Systemen, die Ansätze der dynamischen Energieanalyse beinhalten, bedarf einer kritischen Plausibilitätsprüfung.

Speziell an Wärmemengenmessgeräten bzw. Temperaturmessungen ist eine gewisse Trägheit im Ansprechen der Sensoren durch Vorwärm- und Abkühlzeiten zu beachten. Dabei haben auch Wärmeverluste infolge Ableitung an die Gebäudestruktur, Träger/Haltesysteme einen Einfluss.

Bei berechneten Werten sind ggf. Schleichmengen- oder Nullwertproblematiken zu beachten. Für eine Mittelwertbildung und/oder Summierungen sind bspw. zudem die tatsächlichen Zeiträume zu beachten. Stundenwerte sind nicht immer wirklich Stundenwerte, da reale Betriebszeiten oft kürzer sind und somit unrealistische Kennzahlen bzw. unrealistische spezifische Werte berechnet werden.

Eine leistungsbezogene Momentan- bzw. Stundenwertbetrachtung könnte analog zum leistungsbezogenen Eigenversorgungsgrad beim Strom ein differenzierteres Bild geben und für Steuerungszwecke bzw. das Energiemanagement oder Wärmemanagement dienen, um z. B. eine möglichst effiziente Nutzung der kläranlageneigenen Quellen zu erreichen.

4.1.3 Empfehlungen für die Auswahl von Aggregaten im Zuge der Umsetzung einer dynamischen Energieanalyse

Auf der Aggregatebene kann die Umsetzung einer dynamischen Energieanalyse bzw. eines dauerhaft energetisch günstigen Betriebes ebenfalls wirksam unterstützt werden. Dafür können beispielhaft folgende Empfehlungen für die Auswahl der Aggregate bzw. deren Betrieb gegeben werden:

- ▶ Verstopfungsfrei arbeitende selbst reinigende Pumpen, bei denen akute bzw. regelmäßige Verstopfungs-/Verzopfungsgefahr besteht
- ▶ Ersatz von gewichtsbelasteten Rückschlagklappen an trocken aufgestellten Pumpen durch Pneumatikschieber mit angepasster Steuerung
- ▶ Wenn Faulbehälter-Umwälzung mit Schraubenschaufeln erfolgt, diese dann für FU vorsehen und flexiblen Betrieb ermöglichen
- ▶ Betrieb Heizungspumpen und Heizschlammpumpen flexibilisieren
- ▶ Generell: Anpassung von Pumpen an die Förderaufgabe (Förderhöhe, Verschmutzungsgrad, Bandbreite der zu hebenden Volumenströme, geeignete Pumpenstaffelung)

4.1.4 Hinweise für Steuerungen bei Implementierung einer dynamischen Energieanalyse

Die nutzbringende Umsetzung einer dynamischen Energieanalyse bzw. eines dauerhaft energetisch günstigen Betriebes erfordert ebenfalls geeignete Maßnahmen auf der Ebene der Steuerung der Aggregate und der Gesamtanlage, die vorwiegend auf der Ebene der SPS erfolgen. Je-

doch sind zunehmend auch Lösungen bzgl. intelligenter Steuerung bereits auf Aggregatebene bzw. der Ebene von Aggregatgruppen möglich. Hier ist eine Überschneidung zu den Empfehlungen im vorangegangenen Kapitel gegeben.

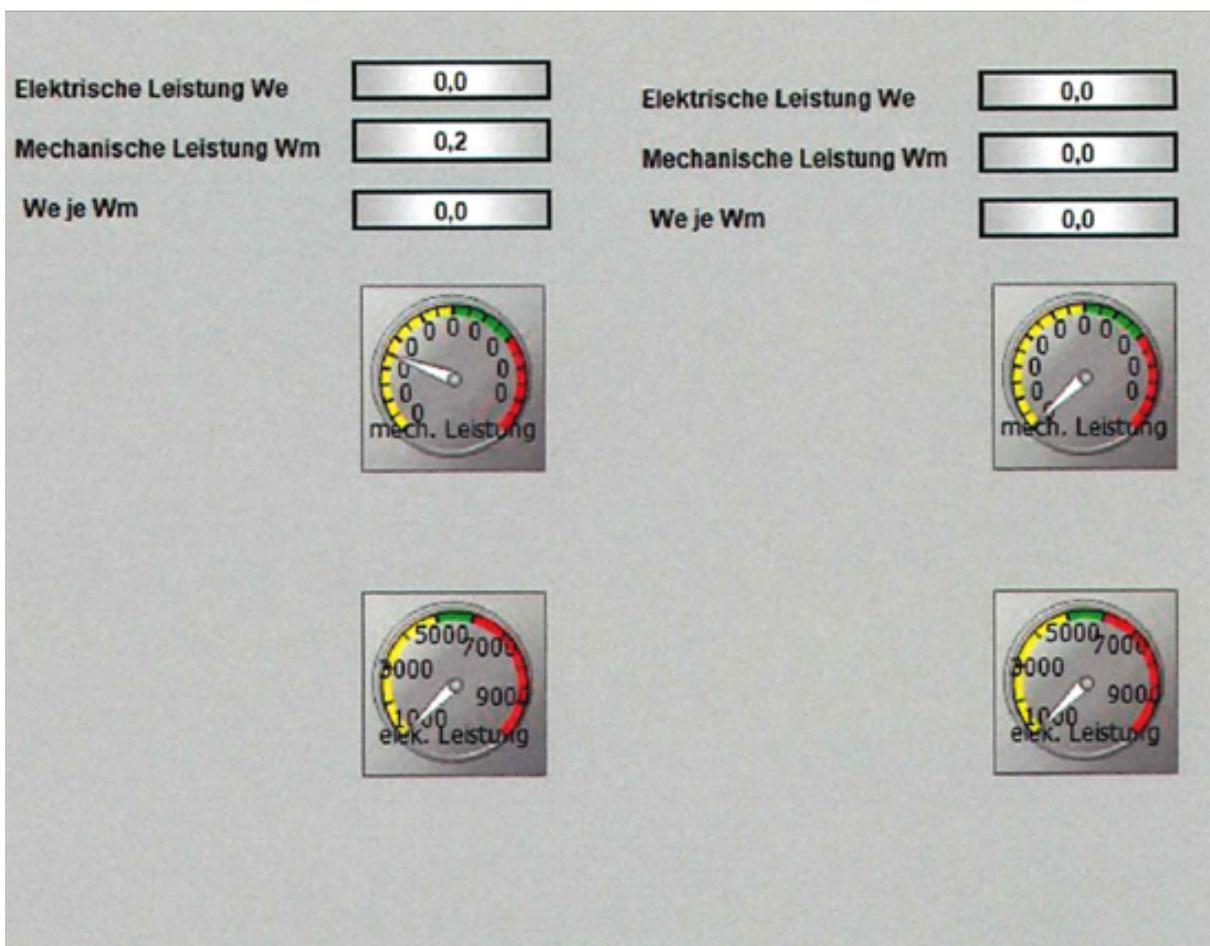
Belastbare Empfehlungen zur Optimierung der Steuerung wären:

- ▶ Selbstregulierende, adaptierbare Belüftungssysteme sind eine komfortable Lösung, wobei diese, bedingt durch die individuellen Gegebenheiten jeder Kläranlage, nicht zwingend auf künstlicher Intelligenz oder Fuzzy-Logik basieren müssen.
- ▶ Vorgefertigte konzipierte Belüftungssteuerungssysteme erweisen sich als sinnvoll für Kläranlagen, in denen personelle Ressourcen begrenzt sind und/oder eine maßgeschneiderte Programmierung auf Anlagenebene (SPS) aus verschiedenen Gründen nicht umsetzbar ist.
- ▶ Die Programmierung der SPS sollte gegebenenfalls so konzipiert sein, dass sie selbstständig anpassbar (korrigierbar) ist, um den Aufwand für spätere Anpassungen und Optimierungen auf ein Minimum zu reduzieren. Dies kann durch eine geschickte Auswahl von anpassbaren Eingangsparametern sowie Zielparametern in einem begrenzten Rahmen erreicht werden. Diese Parameter können über leicht zugängliche Eingabemasken gesteuert werden.

4.1.5 Hinweise für die Darstellung, Nutzung zweier Darstellungsebenen

Für die Darstellung der (zusätzlichen) Messwerte, Parameter und Kennzahlen erscheint es sinnvoll, verschiedene Darstellungsebenen zu nutzen. Die eine erfasst insbesondere die Messwerte auf Aggregatebene, die zweite Ebene bildet größere Zusammenhänge ab.

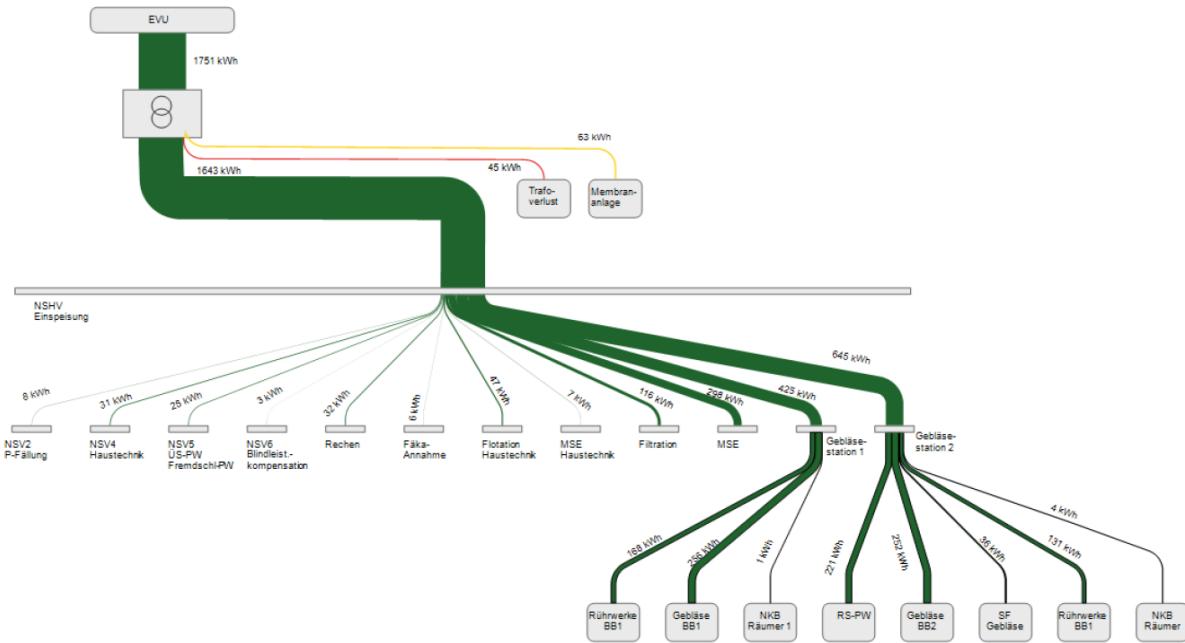
In der ersten Ebene kommt es vor allem darauf an, kurzfristige/wichtige Messwerte zeitnah erfassbar zu machen und schnell eine Einordnung zu bekommen. Dafür eignen sich u. a. Tachodiagramme. Wichtige (alarmierende) Einzelwerte können sinnvoll auch in Signalfeldern sichtbar gemacht werden. In Abbildung 50 ist ein Beispiel für ein Tachodiagramm auf der KA Eilendorf dargestellt.

Abbildung 50: Beispiel für ein Tachodiagramm der KA Eilendorf

(Quelle: KA Eilendorf)

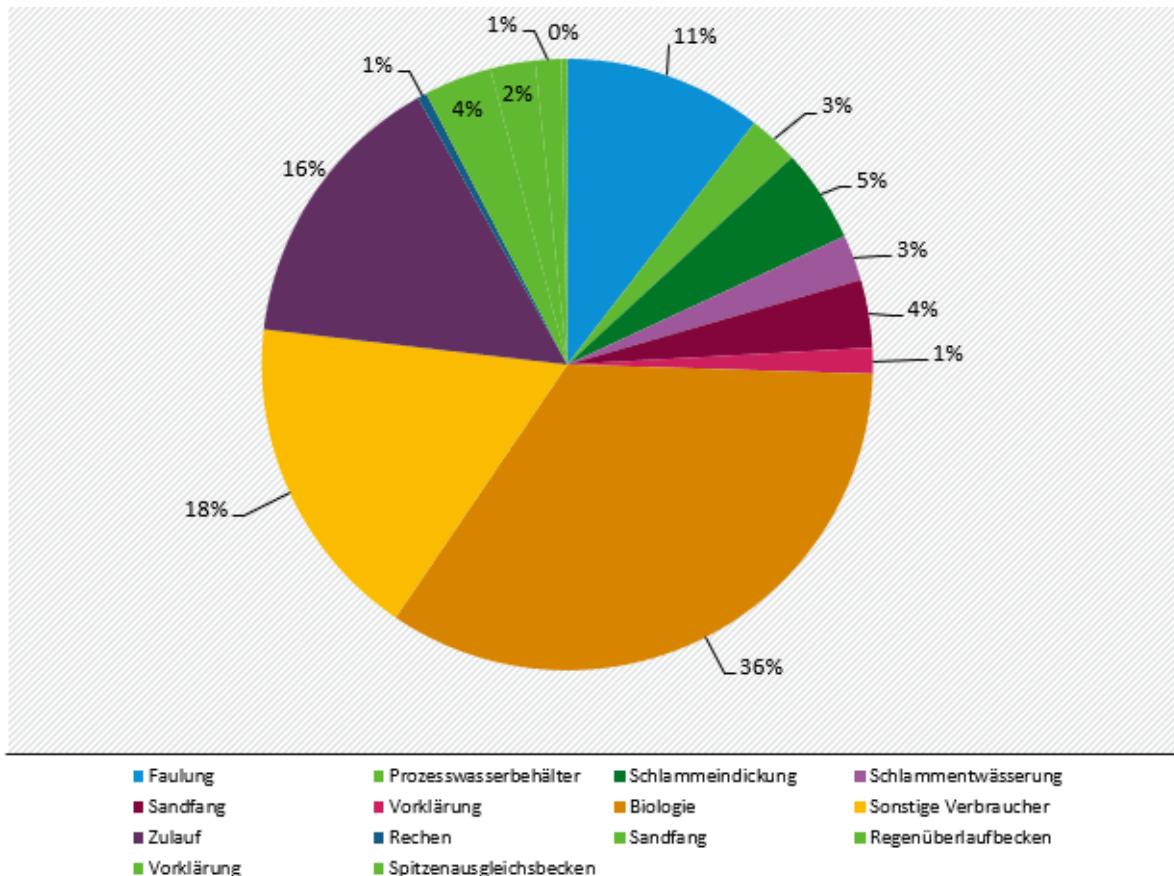
Zur Darstellung übergreifender Zusammenhänge und Bilanzen eignen sich Tortendiagramme und insbesondere Energiefluss-/Massenflussdiagramme (siehe Abbildung 51 und Abbildung 52). Bei einer kleinen Anzahl von Kategorien ermöglichen Tortendiagramme eine klare und intuitive Darstellung der Verhältnisse zwischen den Kategorien. Bei komplexen Zusammenhängen zwischen verschiedenen Variablen oder Faktoren können Sankey-Diagramme dazu beitragen, diese Zusammenhänge auf eine klare und verständliche Art darzustellen.

Abbildung 51: Mittlere Tageswerte der KA Simmerath als Beispiel für eine detaillierte Visualisierung der Energieflüsse mittels Sankey-Diagramm



(Quelle: FiW; KA Simmerath)

Abbildung 52: Beispiel für ein Tortendiagramm

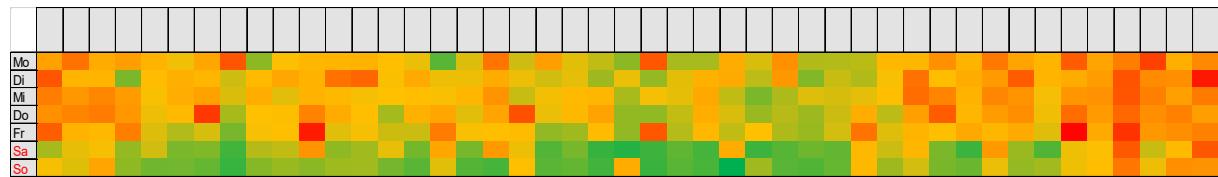


*Fußnote

Quelle: FiW eigene Darstellung

Nicht sofort erschließbare Zusammenhänge können besonders dann über Muster-/Teppichdiagramme sichtbar gemacht werden (Abbildung 53), wenn der Kontext zu nicht augenscheinlichen anderen Größen hergestellt/gesucht werden soll. Teppichdiagramme sind besonders nützlich, um große Datenmengen in einer Matrixform darzustellen.

Abbildung 53: Beispiel für ein Teppichdiagramm



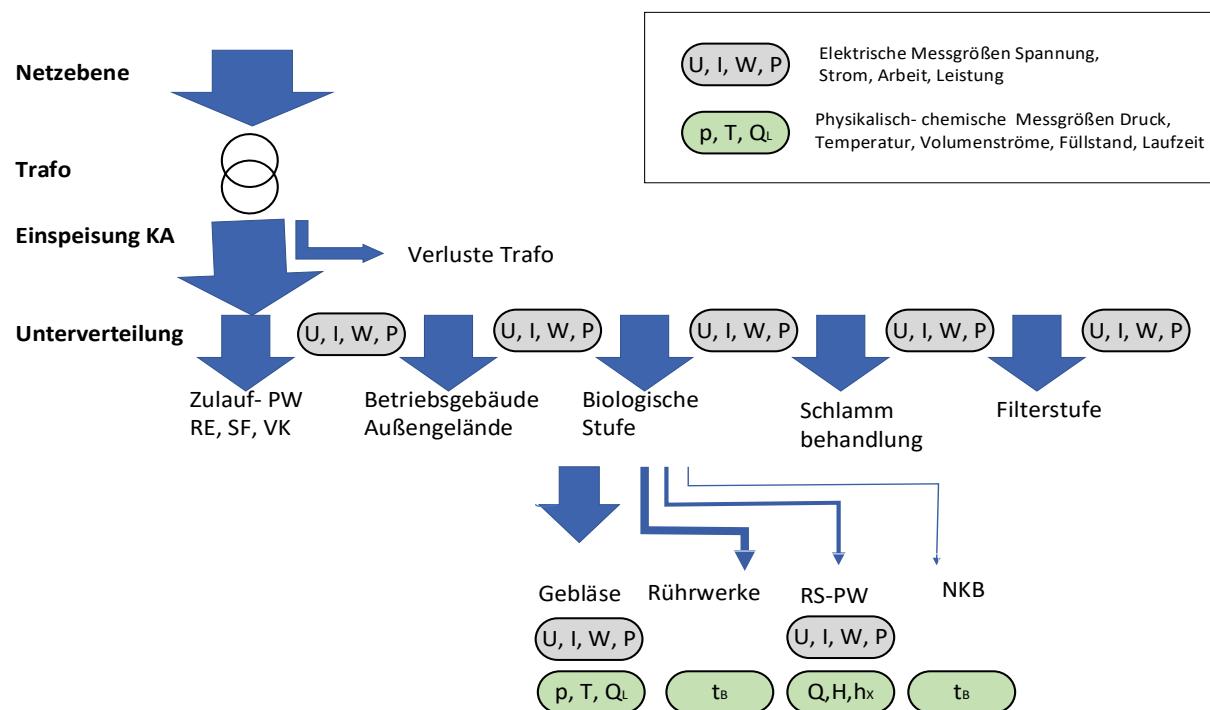
(Quelle: Daten KA Asselbrunn)

4.1.6 Vorschlag für ein Vorgehen für eine dynamisierte Energieanalyse Abfolge der Schritte zu einer dynamisierten Energieanalyse

Nachfolgend wird ein Vorschlag zum Vorgehen und der Reihenfolge der wichtigsten Schritte hin zu einer dynamisierten Energieanalyse unterbreitet. Die einzelnen Schritte erfordern dennoch eine Abstimmung und Iteration mit vorangegangenen Schritten.

1. Zunächst ist eine Bestandsaufnahme der Kläranlagen hinsichtlich Energie, vorhandener Verfahrenstechnik, Belastungssituation, Messtechnik und baulicher Struktur notwendig. Hier ist es vorteilhaft, wenn auf eine bestehende statische Energieanalyse nach DWA-A 216 zurückgegriffen werden kann. Wenn diese nicht vorhanden ist, wäre ein Vorgehen orientierend an der DWA-A 216 zu empfehlen.
 2. Im nächsten Schritt sind die zu ermittelnden Kennzahlen passend zur Kläranlagenverfahrenstechnik festzulegen und die dafür notwendigen Messgrößen zu definieren.
 3. Basierend auf diesen Grundlagen ist das Messkonzept dahingehend zu entwickeln, dass die zusätzlichen, notwendigen Messungen festgelegt und integriert werden.
 4. Ergänzend zu den zusätzlichen Messstellen können auch Aggregate identifiziert werden, die im Zuge einer dynamisierten EA ausgetauscht bzw. eingebaut werden sollen
 5. Sollen Aggregatgruppen unterhalb der Ebene des KA-Leitsystems weitgehend autark optimiert werden, z. B. die Belüftungssteuerung, müssen diese vorher ausgewählt und in das Anlagenkonzept integriert werden.
 6. Für die Visualisierung und Interaktion mit der Anlagensteuerung müssen die geeigneten Software- und Hardwarelösungen (technische Plattform) identifiziert, ausgewählt und installiert werden.
 7. Gemäß den Anforderungen der Kunden erfolgt die Konfiguration/Programmierung des Visualisierungssystems für die zu überwachenden Größen und Kennzahlen. Sofern gewünscht, werden notwendige Verknüpfungen (zum Beispiel im Bereich des Energiemanagements) zur Anlagensteuerung etabliert.

Es erscheint sinnvoll, das Messkonzept der elektrischen Größen (Strom, Leistung) anhand eines Energieflussdiagrammes (Sankey-Diagramm) zu planen (Evans, 2022). Hiermit kann der Leistungsfluss zum jeweiligen Aggregat /Verbraucher sehr gut veranschaulicht werden. Ein Beispiel für ein solches Diagramm ist in Abbildung 54 dargestellt.

Abbildung 54: Messtellenplanung für eine dynamische EA mit Hilfe eines Energieflussdiagramms

(Quelle: FiW, eigene Darstellung)

Ebenso erweist es sich als angebracht, anhand des gegebenen Energieflussdiagramms für ganze Verbrauchergruppen, bzw. an den dafür vorgesehenen Niederspannungshauptverteilungen, Zwischenzähler anzugeben. Auch ist es sinnvoll, spezifische Vorgaben zur Einbeziehung alternativer Kenngrößen zur Ermittlung der elektrischen Leistung bzw. elektrischen Arbeit, wie z.B. die Betriebsdauer, herauszuarbeiten. Über eine Bilanzierung lässt sich auf die Restmenge der jeweiligen Verbrauchergruppen (s. Abbildung 54) schließen.

Zur Ermittlung sachlich richtiger Werte der physikalischen Parameter (Druck, Volumen, Volumenströme, Füllstände, Temperaturen) müssen für deren Messung die Messwertaufnahmen und Auswertungen sorgfältig geplant werden (s. Abbildung 54). Die betrifft z. B. die Aufnahme der tatsächlichen Förderhöhe an Pumpwerken bzw. die Anordnung von MID. Ggf. ergeben sich hier in Schritt 3 aufgrund der Gegebenheiten vor Ort Einschränkungen, eine Abstimmung ist mit Schritt 2 notwendig.

Für Schritt 4 ist ggf. der Einbau innovativer bzw. besonders effizienter Pumpen, Belüfter, Verdichter zu prüfen.

Nach Umsetzung der o. g. Schritte kann mit ersten Testläufen des Systems begonnen werden.

4.1.7 Empfehlungen zum Einsatz einer dynamisierten Energieanalyse

Prinzipiell ist die Installation von Komponenten einer dynamischen Energieanalyse auf allen Kläranlagen mit entsprechender Messtechnik und Datenverarbeitung möglich.

Basierend auf den Ergebnissen des Vorhabens erscheint es aus heutiger Sicht (2023) möglich, eine dynamische, kontinuierliche Energieanalyse bevorzugt auf Kläranlagen der Größenklasse 4 und 5 zu implementieren. Dort können auch sichtbare Einspareffekte erzielt werden, die wahrscheinlich in guter bzw. akzeptabler wirtschaftlicher Relation zu den Aufwendungen für erhöhte Anzahl an Messtellen, Sensoren und Einbindungen in das PLS stehen.

Komponenten einer dynamisierten Energieanalyse könnten auch schrittweise in die Kläranlagentechnik integriert werden – ggf. immer dann, wenn wesentliche Maschinenkomponenten erneuert oder modernisiert werden bzw. die Mess- und Regeltechnik erneuert bzw. signifikant modernisiert wird.

Auf Großkläranlagen sollte die dynamisierte energetische Analyse und ein entsprechend energieoptimierter Betrieb in Zukunft zum Standard gehören.

4.1.8 Handlungsempfehlungen für das Arbeitsblatt DWA-A 216

Im DWA-A 216 wird bisher eine Vorgehensweise zur Energieanalyse beschrieben, die lediglich statisch anwendbar ist. Hier werden durch die Arbeitsgruppe KEK 7.3 die Empfehlungen aus dem hier beschriebenen Vorhaben in einer Novellierung demnächst eingearbeitet und somit zusätzlich eine dynamisierte Vorgehensweise beschrieben, mit der die statische Betrachtung ergänzt wird.

Hier kann insbesondere die im Kap 4.1 formulierte Reihenfolge der durchzuführenden Schritte ein wesentlicher Bestandteil sein, ebenso die Liste der empfohlenen Kennzahlen.

4.2 Weiterer Untersuchungsbedarf

In diesem Vorhaben wurden neue Kennzahlen entwickelt und einer Verifikation unterzogen. Bedauerlicherweise gestaltete sich die Verifikation einiger Wärmekennzahlen aufgrund unzureichender Messergebnisse oder fehlender messtechnischer Kapazitäten als nicht realisierbar. Nachdem die Kläranlagen mit der erforderlichen Messtechnik ausgestattet sind, ist es sinnvoll, in weiteren Untersuchungen die Überprüfung dieser noch nicht verifizierten Wärmekennzahlen durchzuführen. Das Wärmemanagement auf Kläranlagen könnte durch entsprechende Messtechnik und die dazugehörige Auswertung und Datenverarbeitung unterstützt und optimiert werden. Die Optimierung des Wärmemanagements auf Kläranlagen gewinnt zunehmend an Bedeutung, insbesondere angesichts möglicher Zukunftszenarien, in denen größere Anteile von Biogas in Biomethan umgewandelt werden könnten, nicht zuletzt durch die Integration größerer Stromanteile aus anderen erneuerbaren Energiequellen.

Um eine weitreichende, großflächige Integration dynamischer Energieanalysen zu ermöglichen, empfiehlt es sich, das Monitoring über repräsentative Zeitspannen nach der Implementierung der identifizierten Maßnahmen wissenschaftlich zu begleiten. Dies ermöglicht die Verifikation der Effizienz der ergriffenen Optimierungsmaßnahmen und die Evaluierung ihrer Übertragbarkeit auf diverse Kläranlagenstandorte. In diesem Zusammenhang gilt es auch, Langzeiterfahrungen mit intelligenten Aggregaten / Systemen zu sammeln.

Die Erprobung dynamischer Ansätze zur Energieanalyse auf kleineren und mittleren Kläranlagen (10.000 und 40.000 E) könnte Kläranlagen erreichen, die repräsentativ für eine sehr große Anzahl an Kommunen und Zweckverbänden abseits der Ballungszentren ist. Hierunter befinden sich dann häufiger auch Kläranlagen ohne Faulung, wo ggf. noch ein größeres Optimierungspotenzial besteht. Die Unterstützung durch dynamische Ansätze könnte hierbei zur effizienten Hebung dieser Optimierungspotenziale beitragen.

5 Quellenverzeichnis

Aqseptence Group (2017): Aqualogic und Enerlogic - Maximale Reinigungsleistung bei gleichzeitig höchster Energieeffizienz und Prozesssicherheit im Betrieb von Kläranlagen.

<https://www.aqseptence.com/app/de/products/wts-aqualogic-enerlogic/#> (08.11.2021)

Bielfeldt, N. (2021). Ansätze für eine kontinuierliche energetische Untersuchung der Kläranlage zur dauerhaften energetischen Optimierung. Bachelorarbeit, RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft der RWTH Aachen University.

BITControl GmbH. (2021). PROVI ENERGY Online Energieanalyse nach DWA-A 216.

<https://www.bitcontrol.info/provi-energy.html> (11.01.2021)

BN Automation AG. (o.J.). Energiemanagement für Wasser- und Abwasseranlagen. <https://www.bn-automation.com/files/downloads/downloadcenter/produktbroschueren/BNA-Flyer-Energiemanagement-Wasser-web.pdf> (21.04.2021)

BN Automation AG. (o.J.). Kurzbeschreibung Technisches Informations- und Bediensystem (TIBS).

<https://www.bn-automation.com/files/downloads/downloadcenter/produktbroschueren/TIBS%20Kurzbeschreibung.pdf> (28.04.2021)

Boyle, N., Biscardi, P., Guendert, D., Spangenberg, C. (2019). Use Dashboards to improve Water Treatment Plant Performance. In: Opflow 45(11), S. 24-27. Cios, K., Pedrycz, W., Swiniarski, R., Kurgan, L. (2007). Data mining: a knowledge discovery approach. New York, Springer.

Cios, Krzysztof J.; Pedrycz, W.; Swiniarski, R.; Kurgan, L.: 2007. Data mining: a knowledge discovery approach. New York, NY: Springer.

DataForum Software GmbH (o.J.). ACRON – Überblick. <https://www.dataforum.de/acron/%C3%BCberblick> (29.04.2021)

Dürrenmatt, D. (2012). Data Mining für den Kläranlagenbetrieb. In: Aqua & Gas 92, 10, S. 54-60.

Dürrenmatt, D., Thürlmann, C. (2016). Energiedaten zur Analyse und Überwachung Betrieb. In: Daten in Abwasserreinigung, Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute

DWA (2015): Arbeitsblatt DWA-A 216 – Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. DWA Regelwerk.

Expertenbegleitkreis (2020): 1. Treffen mit Expertenbegleitkreis. Diskussion und Input. Videokonferenz, online.

Expertenbegleitkreis (2021): 1. Workshop mit dem Expertenbegleitkreis vom 02.06.2021. Diskussion und Input. Videokonferenz, online.

Evans, J. (2022), interne Ausarbeitungen für Energiemanagement, Wasserverband Eifelrur (WVER)

FlowChief (2018). Abwassertechnische Anlagen. https://www.flowchief.de/wp/wp-admin/admin-ajax.php?action=download_file&post_id=4565&lang=de (28.04.2021)

FlowChief (2019). e-Gem webbasiertes Energiedatenmanagement. https://www.flowchief.de/wp/wp-admin/admin-ajax.php?action=download_file&post_id=7170&lang=de (28.04.2021)

Humoreanu, B., Nascu, I. (2012). Wastewater treatment plant SCADA application. IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR 2012). Cluj-Napoca, Romania.
<http://ieeexplore.ieee.org/document/623776/> (25.03.2021)

- Hurtienne, J., Mohs, C., Meyer, H., Kindsmüller, M., Israel, H. (2006). Intuitive Use of User Interfaces - Definition und Herausforderungen. *i-com* 5, S. 3. <http://www.degruyter.com/view/j/icom.2006.5.issue-3/icom.2006.5.3.38/icom.2006.5.3.38.xml> (20.01.2021)
- Hydrograv. (2017). Betriebsdatenanalyse hydrograv proload.data. https://www.hydrograv.com/wp-content/uploads/2017/03/proload_data_Broschuere.pdf (21.04.2021)
- Kaufmann, M., Villez, K., Dürrenmatt, D. (2015). Verstecktes Potenzial in Kläranlagendaten. In: *Aqua & Gas* 95(2), S. 76-81.
- KA Asselbrunn (2022), Auswertung Betriebsdaten 2020-2022
- KA Aachen-Eilendorf (2021), mündliche Mitteilung und Auswertung Betriebsdaten 2021
- KA Kitzingen (2022), Auswertung Betriebsdaten 2022
- KA Simmerath (2023), Auswertung Betriebsdaten 2023
- KA-Köln-Weiden (2021), mündliche Mitteilung
- Linoff, G., Berry, M. (2011). Data mining techniques: for marketing, sales and customer relationship management. 3. Ausg., Wiley Pub, Indianapolis
- Longo, S., Mauricio-Iglesias, M., Soares, A., Campo, P., Fatone, F., Eusebi, A., . . . Hospido, A. (2019). ENERWATER - A standard method for assessing and improving the energy efficiency of wastewater treatment plants. In: *Applied Energy*, S. 897-910.
https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/14449/improving_energy_efficiency_of_wastewater_treatment_plants-2019.pdf?sequence=4&isAllowed=n (21.04.2021)
- Lubbers, C., Icke, O., van Euden, R., de Koning, M., Huisng, C., de Wit, R. (2018). Performance improvement of wastewater transport systems and treatment processes by performance monitoring and predictive control. 12th European Water Management Conference, Manchester, UK.
- Maimon, O., Rokach, L. (2005). Data mining and knowledge discovery handbook. Springer, New York
- Märkel, C. (o.J.): Keine Energiesteuer und Stromsteuer für BHKW
[https://www.heizungsfinder.de › bhwk › wirtschaftlichkeit › energiesteuer \(09.02.2023\)](https://www.heizungsfinder.de › bhwk › wirtschaftlichkeit › energiesteuer (09.02.2023))
- Meyer, N. (2017). PROVI ENERGY Dokumentation. BITControl GmbH, Nattenheim.
- Passavant (o.J.). Aqualogic/Enerlogic. [https://www.aqualogic.de/de/\(12.11.2021\)](https://www.aqualogic.de/de/(12.11.2021))
- Prakruthi Gowd, B., Jayasree, K., Hegde, Manjunath N. (2018). Comparison of Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic Approaches for Crack Detection in a Beam Like Structure. In *International Journal of Artificial Intelligence & Applications* (Bd. 9, Issue 1, S. 35–51). Academy and Industry Research Collaboration Center (AIRCC). <https://doi.org/10.5121/ijaia.2018.9103>
- Pinnekamp, J., Bolle, F.-W., Schröder, M., Gramlich, E., Gredigk-Hoffmann, S., Koenen, S., Wöffen, B. (2017). Energie und Abwasser Handbuch NRW. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Düsseldorf.
- Rittmeyer. (o.J.). RITUNE Software zur prozessübergreifenden Optimierung des Energie- und Ressourcenverbrauchs auf Kläranlagen.
https://rittmeier.com/fileadmin/user_upload/downloads/produkte/rit-bro-ritune-de-web.pdf (21.04.2021)
- Roth, A. (2016). Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodelle und Use Cases aus der Praxis. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg.
- Schmidt, M. (2006). Der Einsatz von Sankey-Diagrammen im Stoffstrommanagement. Beiträge der Hochschule Pforzheim(124).

SCHRAML. (2018). AQASYS Software. https://www.schraml.de/wp-content/uploads/2018/04/SCHRAML_Software-Brosch%C3%BCre_2018.pdf (21.04.2021)

Seibert Erling, (2021). Systematische Integration von Online-Kennwerten in die Planung und den Betrieb von Kläranlagen, Präsentation Arbeitstreffen KA Köln-Weiden

Thürlmann, C., Dürrenmatt, D., Villez, K. (2015). Energy and process data procesinng and visualisation for optimising wastewater treatment plants. In: Water Practice and Technology 10(1), S. 10-18.

University Cranfield. (2018). D3.4: ENERWATER methodology - Standard method and online tool for assessing and improving the energy efficiency of waste water treatment plants.

ViDEC Data Engineering GmbH (2018). ACRON – Analysen und Berichte zur Optimierung Ihrer Prozesse. <https://www.videc.de/produkte/acron-historian-analyse-berichte-archivierung/> (29.04.2021)

von Känel, L., Braun, D. (2014). Prozessorientierte Visualisierung. In: Aqua & Gas 94, 12, S. 38-45.

Wicklin, R. Allison, R. (2009) Congestion in the sky: visualizing domestic airline traffic with SAS software. 2009 Joint Statistical Meeting, JSM, 1–6 August 2009, Washington, D.C, USA. <http://stat-computing.org/dataexpo/2009/posters/wicklin-allison.pdf> (02.11.2021)

Xylem (2021): Pumpenstationssteuerung Flygt SmartRun® Pumpenstationssteuerung. <https://www.xylem.com/de-de/products-services/pumps--packaged-pump-systems/monitoring--control-equipment/control/pump-station--process-controllers/smartrun/> (08.11.2021)

A Anforderungstabelle an Eingangsdaten für Kennzahlen

Tabelle 12: Anforderungstabelle an Eingangsdaten für Kennzahlen (Teil 1 von 6; Quelle: eigene Darstellung, FiW, BitControl GmbH)

Kennzahlen				Aussage / Information durch Kennzahl		Datenherkunft der Einflussgrößen		
Ifd. Nr.	Bezug zu A 216	Kennzahl	Formel	genutzter Parameter	Aussage prognostiziert	Aussage in Praxis verifiziert und weitere wichtige Infos aus Kennzahl	Berechnung	Messungen und Annahmen
Kennzahlen nach A 216 mit modifizierten (verkürzten) Bezugszeiträumen								
1	1	Spezifischer Gesamtenergiebedarf bezogen auf t_x	$e_{ges,tx} = E_{ges,tx}/EW_{CSB,d}$	$EW_{CSB,d}$ $E_{ges,tx}$	Auslastung der Kläranlage e_{ges} lässt sich statistisch einordnen. Kennzahlen vergleichbarer Anlagen liefern ein Ranking. Dieser Wert liefert eher keine Information über erreichbare Einsparpotenziale.	statistisch belegt, häufig genutzt; Kennzahl zu global für weitere Aussagen	$EW_{CSB,d}$ $E_{ges,tx}$ Gesamtverbrauch Strom (ggf. aus anderen Größen berechnet)	$c_{CSB,Zulauf}; Q_d;$ Annahme: $B_{d,CSB,Zulauf} = 120 \text{ g}/EW^*d$ $E_{ges,tx}$ (idealerweise); Eigenerzeugung; Netzbezug; Einspeisung
2	2	Spezifischer Belüftungsenergiebedarf bezogen auf t_x	$e_{Bel,tx} = E_{bel,tx}/EW_{CSB,d}$	$EW_{CSB,d}$ $E_{bel,tx}$	e_{Bel} lässt sich statist. einordnen. Kennzahl wird mit Kennz. Ander. BB verglichen, liefert Ranking, Wert liefert Info über erreichb. Einsparpotenziale, da Erfahrungsw. für modernis. Anlagen	erste Erkenntnisse positiv, jedoch nicht durchgehend, Problem geeignete Referenzwerte für EW kurzfristig verfügbar	$EW_{CSB,d}$ $E_{Bel,tx}$ Stromverbrauch der Belüftung	$c_{CSB,Zulauf}; Q_d;$ Annahme: $B_{d,CSB,Zulauf} = 120 \text{ g}/EW^*d$ Stromverbräuche der Einzelaggregate (alternativ: Leistungsmessungen)
3	4	spezif. Faulgasproduktion bezogen auf 1 Tag	$Y_{FG} = Q_{FG,d,aM}/B_{d,oTM,aM}$	$Q_{FG,d,aM}$ $B_{d,oTM,aM}$		Statistisch ausführlich belegt	evtl. Umrechnung auf Normzustand, darauf wird meistens aufgrund Messungenauigkeit der Gasdurchflussmessung verzichtet.	$Q_{FG,d,aM}$ $Q_{üS}; \text{Trockenrückstand}; GV;$ (selten hat man alle Informationen)
4	6	Eigenversorgungsgrad (Momentanwert) kontinuierliche Erfassung/ Tageswerte	$EV_{El,tx} = (E_{KWK,el,tx}/E_{ges}) \cdot 100$	$E_{KWK,el}$ E_{ges}		Statistisch ausführlich belegt durch Durchschnittswerte		Zähler oder Messung der Wirkleistung von Stromzählern und Erzeugerzählern, sowie Einspeisezählern
5	8	Spezifischer Stromverbrauch Pumpwerk, Momentanwert	$e_{PW,tx} = E_{PW} * 1000/(Q_{PW} \cdot h_{man})$	E_{PW} Q_{PW} h_{man}	Aussage über spez. Leistung Pumpe / m^3 und m Förderhöhe in versch. Betriebssituationen (B.-Punkten),	Statistisch belegt durch Durchschnittswerte; Zeitlicher Verlauf, Auftragung über Durchfluss zeigt unterschiedliches Verhalten bei gleichen Durchflussmengen und gibt Hinweise auf Verbesserungen der Regelung		Stromaufnahme oder Leistung jeder Pumpe MID möglichst in jeder einzelnen Druckleitung Druck druckseitig direkt an der Pumpe

(Quelle: FiW und BitControl GmbH, eigene Darstellung)

Tabelle 13: Anforderungstabelle an Eingangsdaten für Kennzahlen (Teil 2 von 6; Quelle: eigene Darstellung, FiW, BitControl GmbH)

Ifd. Nr.	Kennzahlen			Aussage / Information durch Kennzahl		Datenherkunft der Einflussgrößen		
	Bezug zu A 216	Kennzahl	Formel	genutzter Parameter	Aussage prognostiziert	Aussage in Praxis verifiziert und weitere wichtige Infos aus Kennzahl	Berechnung	Messungen und Annahmen
Kennzahlen nach A 216 mit modifizierten Bezugsgrößen								
6	6	Eigenversorgungsgrad EV _P (Momentanwert)	$EV_{P,tx} = (P_{eigen,el}/P_{ges}) \cdot 100$	P _{eigen,el} P _{ges}	Aussage über Eigenversorgung als Momen- tan-/Kurzzeit-) Wert	Statistisch belegt durch Durchschnitts- werte; Grundlage zur Verbesserung des Ener- gie- und Lastmanagements		Zähler oder Messung der P _{wirk} von Strom- & Erzeuger- & Einspeisezähler
7	2	Spezifischer Belüftungs- leistungsbedarf	$e_{ver}^* = P_{Verdichter}/(Ql \cdot p)$	P _{Verdichter} Ql p	Aussage über Stromverbrauch Verdichter als Momen- tanwert (Kurzzeitwert)	Statistisch belegt durch Durchschnitts- werte; ggf. Eignung zur Verbesserung des Ener- gie- und Lastmanagements	Berechnung der Luftmenge aus den Gebläsedatenblättern	Stromaufnahmen oder Leistungsmes- sungen der Gebläse, auch von FU ab- greifbar
								Luftmengenmessung in Druckleitung direkt an Gebläsen
Kennzahlen zur Beschreibung Abweichungsanalyse								
8	8	Abweichung spez. Strom- verbrauch Pumpwerk von Startwert f(t ₀)	$\Delta e_{PW} = ((P_{PW,tx} - P_{PW,t0})/(Q_{PW} \cdot H_{man})) / P_{PW,t0}$	P _{PW,tx} P _{PW,t0} Q _{PW} H _{man}	Aussage über Abweichung spez. Leistung Pumpe / m ³ und m Förderhöhe von Mittelwert/Bezugswert	Erkenntnisse positiv; Schleichende Veränderungen	Aktueller Wert / Startwert	Stromaufnahmen / Leistungsmes- sungen, auch von FU abgreifbar
								MID
9	2	Abweichung spez. Strom- verbrauch Belüftung von Startwert f(t ₀)	$\Delta e_{Bel} = (P_{Bel,tx} - P_{Bel,t0}) / P_{Bel,t0}$	P _{Bel,tx} P _{Bel,t0}	Aussage über Abweichung spez. Leistung Gebläse von Startwert/Bezugswert	Neu; Verifikation noch nicht abgeschlos- sen; Schleichende Veränderungen, Auswir- kungen von Änderungen in der Regelung oder Maschinentechnik	Wie oben	Stromaufnahmen / Leistungsmes- sungen, auch von FU abgreifbar
10		Relatives Schlammlalter	$\Delta t_{TS} = t_{TS,IST} / t_{TS,soll}$	t _{TS,IST} t _{TS,soll}	Aussage über Abweichung IST - Schlammlalter von notwendigem Schlammlalter	Erkenntnis positiv; t _{TS} , TS-Konzentration in Abhängigkeit der Temperatur, jahres- zeitliche Schwankungen	Berechnung nach A131 und aus Messwerten, V _{BB} ·TS _{BB} /Ü _{sd}	TS _{BB,T} ; (Sicherheitsfaktor für t _{TS})

(Quelle: FiW und BitControl GmbH, eigene Darstellung)

Tabelle 14: Anforderungstabelle an Eingangsdaten für Kennzahlen (Teil 3 von 6; Quelle: eigene Darstellung, FiW, BitControl GmbH)

Kennzahlen				Aussage / Information durch Kennzahl			Datenherkunft der Einflussgrößen	
Ifd. Nr.	Bezug zu A 216	Kennzahl	Formel	genutzter Parameter	Aussage prognostiziert	Aussage in Praxis verifiziert und weitere wichtige Infos aus Kennzahl	Berechnung	Messung und Annahmen
Neue Kennzahlen im Bereich Wärme								
11	10	Spezifischer Gesamtwärmebedarf	$e_{therm,ges} = E_{therm}/EW_{CSB,a}$	E_{therm} $EW_{CSB,a}$	Gesamtwärmebedarf bezogen auf EW	erste Erkenntnis positiv; bei Bezug auf Tageswert Referenz zu Außen-T und Abwasser-T	Bilanz aller Wärmeerzeuger und -verbraucher	Wärmemessung aller Erzeuger und aller Verbraucher
12	11	Spezifischer Gesamtwärmebedarf Gebäude	$e_{therm,Gebäude} = E_{therm,Gebäude}/EW_{CSB,a}$	$E_{therm,Gebäude}$ $EW_{CSB,a}$	Wärmebedarf beheizter Gebäudeflächen bezogen auf EW	erste Erkenntnis positiv; es gibt jedoch schon allgemeine Gebäudereferenzwerte; bei Bezug auf Tageswert Referenz zu Außen-T und Abwasser-T	Bezug nicht auf EW, sondern auf die Fläche	Wärmemess. des Verbrauchers bzw. beheizt. Gebäudefläche; Abmess. beheiz. Gebäudeflächen (m^2)
13	12	Spezifischer Gesamtwärmebedarf Schlamm	$e_{therm,Schlamm} = E_{therm,RS} - E_{wärm+FB}/EW_{CSB,a}$	$E_{therm,RS}$ $E_{wärm+FB}$ $EW_{CSB,a}$	Wärmebedarf zur Schlamm-aufheizung bezogen auf EW	erste Erkenntnis positiv; Funktion der Heizungsverteilung, Wirkungsgrad des Wärmetauschers	Berechnung der Schlammaufheizung zur Kontrolle, Bezug auf die Schlammmenge	Wärmemessung des Verbrauchers; Messung der Schlammengen
14	13	Spezifischer Gesamtwärmebedarf Trocknung	$e_{therm,Trocknung} = E_{therm,Trocknung}/EW_{CSB,a}$	$E_{therm,Trocknung}$ $EW_{CSB,a}$	Wärmebedarf für KS-Trocknung bezogen auf EW	sehr wenig Referenzwerte; Schleichende Veränderungen zeigen Wartungsanforderungen	Bezug auf die Schlammengen	Wärmemessung des Verbrauchers; Messung der Schlammengen
15	14	Eigenversorgungsgrad Wärme	$EV_{Wärme} = E_{Wärme}/(E_{Wärme,eigen} + E_{Wärme,fremd})$	$E_{Wärme}$ $E_{Wärme,eigen}$ $E_{Wärme,fremd}$	Wärmeerzeugung bezogen auf Gesamtbedarf Wärme	erste Erkenntnis positiv; Einbeziehung auch der elektr. beheizten Anlagen, bessere Abgrenzung zum Prozessenergiebedarf		Wärmemessung der Verbraucher KWK -Wärme Strommessung el. Heizung o. ext. Brennstoff
16	15	Externer therm. Energiebezug	$e_{th,ext,AG} = E_{th,ext}/EW_{CSB,Mo}$	$E_{th,ext}$ $EW_{CSB,Mo}$	externer Energiebezug inkl. auch Strom fürs el. Heizen	keine Info, da meist keine separate Messung bei el. Heizung	Wärmemenge aus den Eigenschaften des Heizmittels, z.B. 10 kWh/L Heizöl oder 10 kWh/ m^3 Erdgas	Strommessung el. Heizung o. ext. Brennstoff; (Faktoren Heizmittel)
17	16	Wärme Notkühler	$e_{th,Notkühler} = E_{th,Notkühler}/E_{therm,BHKW}$	$E_{th,Notkühler}$ $E_{therm,BHKW}$	Darstellung von ungenutzter thermischer Energie	erste Erkenntnis positiv; Internes Wärmemanagement	ggf. aus Brennstoffbedarf und E_{el} , erzeugt	Wärmemessung Zu- und Ablauf Notkühler Wärmemengen BHKW
18	17	Spezifische Wärme Notkühler	$e_{th,Notkühler} = E_{th,Notkühler}/E_{Biogas}$	$E_{th,Notkühler}$ E_{Biogas}	Darstellung von ungenutzter thermischer Energie	erste Erkenntnis positiv; Internes Wärmemanagement, Quantifizierung Wärmeüberschüsse	ggf. aus Brennstoffbedarf und E_{el} , erzeugt	Wärmemessung Zu- Ablauf Notkühler Wärmemengen BHKW
19	18	Spezifische Wärme Gebäudefläche	$e_{th,ext,AG} = E_{th,ext}/AG$	$E_{th,ext}$ AG	externer Wärmebezug bezogen auf Gebäudefläche	Internes Wärmemanagement, Ableit. Sanierungsbedarf?	Wärmemenge aus den Eigenschaften des Heizmittels	Wärmemessung Zu- und Ablauf Notkühler; (Faktoren Heizmittel)
20	19	Spezifische Wärme Schlamm-aufheizung	$e_{th,FB} = E_{th,FB}/V_{FB}$	$E_{th,FB}$	Effizienz der Schlamm-wärmung	Problemidentifikation (z. B. Anbackungen/Verkrustungen)	Bezogen auf die Rohschlammengen	Wärmemessung des Verbrauchers
21	20	Spezifische Wärme Schlamm-aufheizung	$e_{th,FB} = E_{th,FB}/Q_{RS,FB}$	$E_{th,FB}$ $Q_{RS,FB}$	Effizienz der Schlamm-wärmung	Problemidentifikation (z. B. Anbackungen/Verkrustungen)	Bezogen auf die Rohschlammengen	Wärmemessung des Verbrauchers

(Quelle: FiW und BitControl GmbH, eigene Darstellung)

Tabelle 15: Anforderungstabelle an Eingangsdaten für Kennzahlen (Teil 4 von 6; Quelle: eigene Darstellung, FiW, BitControl GmbH)

Kennzahlen				Qualitative Aussagen zur Kennzahlerstellung			Mögliche Schwierigkeiten/ Hindernisse	
Ifd. Nr.	Be- zug zu A 216	Kennzahl	Formel	genutz- ter Para- meter	Notwendige Messwertdichte der Einflussgröße für Kennzahlbildung	Notwendige/ sinnvolle zeitliche Auflösung Kennzahl	Messwertgewinnung + Datengenauigkeit (Einflussgröße)	Häufig fehlende Messungen/ Messzähler Anforderungen an die Datengenauigkeit (...)
Kennzahlen nach A 216 mit modifizierten (verkürzten) Bezugszeiträumen								
1	1	Spezifischer Gesamtenergiebedarf bezogen auf t_x	$e_{ges,tx} = E_{ges,tx}/EW_{CSB,d}$	$EW_{CSB,d}$ $E_{ges,tx}$	$c_{CSB,Zulauf}$, 24 h Mischprobe oder online; kont. Durchflussmessung (online); (nach A198: min. 40 Proben je Be- trachtungszeitraum notwendig)	$c_{CSB,Zulauf}$: tägliche Messwerte; Q_d : tägliche Messwerte	$c_{CSB,Zulauf}$ Labordaten (Handdaten), ggf. online in mg/l; Q_d Onlinemessung (Aufsummierung der Zuflussmenge für jeden Tag in m^3/d); CSB-Frachten + Abwassermengen, kleine Kläranlagen CSB, CSB nasschemisch genauer als online	tägliche CSB-Werte gibt es ggf. bei GK5; bei KA der KG 3-4 meistens 1 mal pro Woche, bei GK 1-2 meist nur 1 mal pro Monat.; $e_{ges,tx}$ kann nur für die Tage gebildet werden, an denen auch die CSB-Zulauf-Konzentration vorliegt. Bei Anlagen bis GK IV wird meist nur wöchentlich gemessen.; automat. Erfassung Strom (Netz-) zählers ist unabdingbar repräsentative Werte + Genauigkeit - noch kaum statist. Referenzwerte
2	2	Spezifischer Belüftungsenergiebedarf bezogen auf t_x	$e_{bel,tx} = E_{bel,tx}/EW_{CSB,d}$	$EW_{CSB,d}$ $E_{bel,tx}$	wie e_{ges} $E_{bel,tx}$: bevorzugt kontinuierlich; Tageswert bzw. Monatswert	Zur Trenderkennung von Maßnahmen können auch die verfügbaren täglichen Kennwerte genutzt werden.	Ohne Nachkommastelle	$e_{bel,tx}$ nur für die Tage bildbar, an denen auch die CSB-Zulaufkonzentration vorliegt. Bei Anlagen bis GK IV meist nur wöchentliche Messung ggf. Ersatzwert für organ. Belastung nutzen wie online TOC/online BSB mit Umrechnungsfaktor; Stromaufnahme oder Leistung der Gebläse fehlt öfters, sollte in jedem Fall nachgerüstet werden.
3	4	spezif. Faulgasproduktion bezogen auf 1 Tag	$Y_{FG} = Q_{FG,d,aM}/B_{d,o}$ TM,aM	$Q_{FG,d,aM}$ $B_{d,oTM,aM}$	Tagesmenge Tageswert	Tageswert	therm. Massendurchflussmesser; Ohne Nachkommastelle MID; TR aus Onlinesonde / Handanalyse; GV aus Handanalyse; Ohne Nachkommastelle	Gasdurchflussmessungen sind oft fehlerhaft. Die Werte sind grundsätzlich kritisch zu prüfen, Umrechnung auf den Normzustand ist oft vernachlässigbar GV bisher nur über Handmessung, ggf. Interpolation aus wenigen wöchentlichen Daten
4	6	Eigenversorgungsgrad (Momentanwert) kont. Erfassung / Tageswerte	$EV_{El,tx} = (E_{KWK,el,tx}/E_{ges}) \cdot 100$	$E_{KWK,el}$ E_{ges}	Kontinuierlich online Tageswert	Mindestens 15 Minuten Kontinuierliche Erfassung/ Tageswerte	Automatisch, Zähler oder Messungen; Ohne Nachkommastelle Ohne Nachkommastelle	Die Messwerteinfrastruktur muss bei jedem Projekt sorgfältig diskutiert werden
5	8	Spez. Stromverbrauch Pumpwerk, Momentanwert	$e_{PW,tx} = E_{PW} * 1000/(Q_{PW} \cdot h_{man})$	E_{PW} Q_{PW} h_{man}	Kontinuierlich online Kontinuierlich online Kontinuierlich online	wenige Sekunden wenige Sekunden wenige Sekunden	Automatisch, Zähler oder Messungen; Ohne Nachkommastelle Automatisch, Zähler oder Messungen; eine Nachkommastelle Automatisch, Zähler oder Messungen; eine Nachkommastelle	Druckmessungen sollten in Pumpwerken nach Möglichkeit nachgerüstet werden. Das ist zurzeit noch nicht üblich

(Quelle: FiW und BitControl GmbH, eigene Darstellung)

Tabelle 16: Anforderungstabelle an Eingangsdaten für Kennzahlen (Teil 5 von 6; Quelle: eigene Darstellung, FiW, BitControl GmbH)

Kennzahlen					Qualitative Aussagen zur Kennzahlerstellung			Mögliche Schwierigkeiten/ Hindernisse
Ifd. Nr.	Bezug zu A 216	Kennzahl	Formel	genutzter Parameter	Notwendige Messwertdichte der Einflussgröße für Kennzahlbildung	Notwendige/ sinnvolle zeitliche Auflösung Kennzahl	Messwertgewinnung + Datengenauigkeit (Einflussgröße)	Häufig fehlende Messungen/ Messzähler Anforderungen an die Datengenauigkeit (...)
Kennzahlen nach A 216 mit modifizierten Bezugswerten								
6	6	Eigenversorgungsgrad EV _P (Momentanwert)	EV _{P,tx} = (P _{eigen,el} /P _{ges})·100	P _{eigen,el} P _{ges}	wenige Sekunden	wenige Sekunden	Automatisch, Zähler oder Messungen * ²	
Kennzahlen zur Beschreibung Abweichungsanalyse								
8	8	Abweichung spez. Stromverbrauch Pumpwerk von Startwert f(t ₀)	Δe _{PW} = ((P _{PW,tx} - P _{PW,t0})/(Q _{PW} · H _{man}))/P _{PW,t0}	P _{PW,tx} P _{PW,t0} Q _{PW} H _{man}	<minütlich <minütlich <minütlich <minütlich	minütlich bis stündlich	Automatisch, Zähler oder Messungen * ² Automatisch, Zähler oder Messungen * ¹ Automatisch, Zähler oder Messungen * ²	
9	2	Abweichung spez. Stromverbrauch Belüftung von Startwert f(t ₀)	Δe _{Bel} = (P _{Bel,tx} - P _{Bel,t0})/P _{Bel,t0}	P _{Bel,tx} P _{Bel,t0}	Stundenwert bis Tageswert	stündlich bis täglich	Automatisch, Zähler oder Messungen * ¹	
10		Relatives Schlammatter	Δt _{TS} = t _{TS,IST} /t _{TS,soll}	t _{TS,IST} t _{TS,soll}	Hier sollte der Wert für einen Zeitraum eines Schlammaters gebildet werden, ca. 12 - 25 Tage	täglich	T, TSBB über Messungen * ² * ²	

(Quelle: FiW und BitControl GmbH, eigene Darstellung)

Tabelle 17: Anforderungstabelle an Eingangsdaten für Kennzahlen (Teil 6 von 6; Quelle: eigene Darstellung, FiW, BitControl GmbH)

Kennzahlen				Qualitative Aussagen zur Kennzahlerstellung				Mögliche Schwierigkeiten/ Hindernisse
Ifd. Nr.	Bezug zu A216	Kennzahl	Formel	genutzter Parameter	Notwendige Messwertdichte der Einflussgröße für Kennzahlbildung	Notwendige/ sinnvolle zeitliche Auflösung Kennzahl	Messwertgewinnung + Datengenauigkeit (Einflussgröße)	Häufig fehlende Messungen/ Messzähler Anforderungen an die Datengenauigkeit (...)
Neue Kennzahlen im Bereich Wärme								
11	10	Spezifischer Gesamtwärmebedarf	$e_{therm,ges} = E_{therm}/EW_{CSB,a}$	E_{therm} $EW_{CSB,a}$	Tageswert	Jahreswert, Tageswert	Wärmemengenzähler, Temperaturmessungen und Volumenströme * ²	Auf die Qualität der Wärmemessungen wird zurzeit noch wenig Augenmerk gelegt. Das ist eine aktuelle Herausforderung
12	11	Spezifischer Gesamtwärmebedarf Gebäude	$e_{therm,Gebäude} = E_{therm,Gebäude}/EW_{CSB,a}$	$E_{therm,Gebäude}$ $EW_{CSB,a}$	Tageswert	Jahreswert, Tageswert	Wärmezähler Verbraucher; Abmessungen beheizter Gebäudeflächen (m^3) * ²	Wärmemessungen der beheizten Gebäude häufig nicht vorhanden
13	12	Spezifischer Gesamtwärmebedarf Schlamm	$e_{therm,Schlamm} = E_{therm,RS} - E_{wärm+FB}/EW_{CSB,a}$	$E_{therm,RS}$ $E_{wärm+FB}$ $EW_{CSB,a}$	Tageswert	Jahrsewert, Monatswert, Tageswert	Wärmezähler; Durchflussmesser Schlamm-Mengen; * ²	Wärmemessungen im Schlammstrom notwendig
14	13	Spezifischer Gesamtwärmebedarf Trocknung	$e_{therm,Trocknung} = E_{therm,Trocknung}/EW_{CSB,a}$	$E_{therm,Trocknung}$ $EW_{CSB,a}$	Tageswert	Jahrsewert, Monatswert, Tageswert	Wärmezähler; Durchflussmesser Schlamm-Mengen; * ²	Wärmemessungen notwendig
15	14	Eigenversorgungsgrad Wärme	$EV_{wärme} = E_{wärme} / (E_{wärme,eigen} + E_{wärme,fremd})$	$E_{wärme}$ $E_{wärme,eigen}$ $E_{wärme,fremd}$	Tageswert Tageswert Tageswert	Jahres-, Monats-, Tageswert	Wärmezähler * ² Wärmezähler * ² Verbrauchsmessungen * ²	Wärmemengenmessung, oft nicht gegeben
16	15	Externer therm. Energiebezug	$e_{th,ext,AG} = E_{th,ext}/EW_{CSB,Mo}$	$E_{th,ext}$ $EW_{CSB,Mo}$	Tageswert	Jahreswert, Monatswert, Tageswert	Wärmezähler, separater Stromzähler * ²	Messungen exterer Bezug notwendig, ggf. separater Stromzähler el. Heizung oder WP
17	16	Wärme Notkühler	$e_{th,Notkühler} = E_{th,Notkühler}/E_{therm,BHKW}$	$E_{th,Notkühler}$ $E_{therm,BHKW}$	Tageswert	Jahreswert, Monatswert, Tageswert	Wärmezähler * ² Wärmezähler * ²	Wärmemessungen notwendig
18	17	Spezifische Wärme Notkühler	$e_{th,Notkühler} = E_{th,Notkühler}/E_{Biogas}$	$E_{th,Notkühler}$ E_{Biogas}	Tageswert	Jahreswert, Monatswert, Tageswert	Wärmezähler * ²	Wärmemessungen notwendig
19	18	Spezifische Wärme Gebäudedefläche	$e_{th,ext,AG} = E_{th,ext}/AG$	$E_{th,ext}$ AG	Tageswert	Jahreswert, Monatswert, Tageswert	Wärmezähler * ²	Wärmemessungen notwendig
20	19	Spezifische Wärme Schlammaufheizung	$e_{th,FB} = E_{th,FB}/V_{FB}$	$E_{th,FB}$ V_{FB}	Tageswert	Jahreswert, Monatswert, Tageswert	Wärmezähler * ²	Wärmemessungen im Schlammstrom notwendig
21	20	Spezifische Wärme Schlammaufheizung	$e_{th,FB} = E_{th,FB}/Q_{RS,FB}$	$E_{th,FB}$ $Q_{RS,FB}$	Tageswert	Jahreswert, Monatswert, Tageswert	Wärmezähler * ²	Wärmemessungen im Schlammstrom notwendig

Quelle: FiW und BitControl GmbH, eigene Darstellung