

Abschlussbericht

Monitoring "Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0"

Autoren: Prof. Günter Müller-Czygan, Viktoriya Tarasyuk (PhD), Pavel Timofeev
inwa Institut für nachhaltige Wassersysteme der Hochschule Hof
Forschungsgruppe Wasserinfrastruktur und Digitalisierung



Stand: 30.09.2024

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	11
2. Hintergrund und Aufgabenstellung	12
2.1. Ausgangslage	12
2.2. Projekt „Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0“	13
2.3. Aufgabenstellung	14
2.3.1. <i>Aufgabeninhalt</i>	14
2.3.2. <i>Aufgabenziele</i>	16
3. Technische Beschreibung der Kläranlage Heringhausen	19
3.1. Realisiertes Verfahrenskonzept	19
3.2. Modellhafter Neuheitswert	23
3.2.1. <i>Biologische Abwasserbehandlung mit SBR-Verfahren</i>	23
3.2.2. <i>Innovative Steuerung und Netzbewirtschaftung mit CBR-Prinzip</i>	24
3.2.3. <i>Stand der Technik und Wissenschaft zum Einsatz von CBR in der Wasserwirtschaft</i>	27
3.2.3.1. <i>Granollers WWTP</i>	29
3.2.3.2. <i>Fehlererkennung in Pumpstationen</i>	31
3.2.3.3. <i>Hydrodynamisches Wasserqualitätsmodell und GIS</i>	31
3.2.3.4. <i>Identifikation anormaler Situationen bei der Nährstoffentfernung in SBR-Anlagen</i> 33	
4. Aufbau CBR-System	34
4.1. Simulationswerkzeug SIMBA	34
4.2. Realisiertes Verfahrenskonzept	37
4.2.1. <i>Entscheidungsgrundlage für CBR</i>	37
4.2.2. <i>CBR-Modell</i>	37
4.2.2.1. <i>Modellaufbau</i>	37
4.2.2.2. <i>Einbezug des Betriebspersonals</i>	42
4.2.2.3. <i>Abgleich der simulierten Lastfalldaten mit der Realsituation</i>	43
4.2.2.4. <i>CBR-Datenmodell</i>	44
4.2.3. <i>Einsatz CBR-Modell</i>	48
5. Monitoring	51
5.1. Untersuchungsaufbau	51
5.1.1. <i>Auswertung Onlinedaten (SCADA)</i>	51
5.1.2. <i>Begleitende Probenahme und -analyse</i>	51
5.2. Ergebnisse	51
5.2.1. <i>Frachtanalyse</i>	51
5.2.2. <i>Energieanalyse</i>	53
5.2.2.1. <i>Energiedaten der Planungsphase</i>	53

5.2.2.2.	<i>Energiedaten aus dem Messzeitraum</i>	57
5.2.2.2.1.	<i>Jahresbetrachtung</i>	57
5.2.2.2.2.	<i>Monatsbetrachtung</i>	61
5.2.2.2.3.	<i>Analyse</i>	85
5.2.2.3.	<i>Energiebilanz (nach DWA A 216) für die realisierte Kläranlage Heringhausen</i> 88	
5.2.3.	<i>Reinigungsergebnisse</i>	90
5.2.3.1.	<i>CSB</i>	91
5.2.3.2.	<i>BSB₅</i>	91
5.2.3.3.	<i>NH₄-N</i>	92
5.2.3.4.	<i>N_{ges}</i>	92
5.2.3.5.	<i>P_{ges}</i>	93
5.2.3.6.	<i>Ergebniseinordnung</i>	93
5.2.4.	<i>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</i>	94
5.2.5.	<i>Schwierigkeiten im Zuge des Messprogramms</i>	95
5.3.	<i>Ergebnisbewertung</i>	98
6.	Übertragbarkeit auf andere Anlagen	99
6.1.	<i>Hohe Anzahl auslaufender Genehmigungen</i>	99
6.2.	<i>Hohe Akzeptanz des CBR-Verfahrens</i>	99
6.3.	<i>Exemplarische Größe Heringhausen</i>	100
7.	Fazit und Ausblick	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spezifischer Gesamtstromverbrauch in Abhängigkeit vom Reinigungsverfahren (Quelle: DWA-A 216)	18
Abbildung 2: Spezifischer Stromverbrauch für die Belüftung e_{BeI} der Kläranlagen (Quelle: DWA-A 216)	18
Abbildung 3: R&I-Verfahrensfließbild SBR-Anlage Heringhausen.....	19
Abbildung 4: Lageplan SBR-Anlage Heringhausen	19
Abbildung 5: Darstellung mechanische Reinigung und MAB der SBR-Anlage Heringhausen	20
Abbildung 6: Darstellung Maschinenhaus und SBR-Reaktoren der SBR-Anlage Heringhausen.....	20
Abbildung 7: SBR-Becken in Halle Kläranlage Heringhausen.....	21
Abbildung 8: Schlamm Speicher in Halle Kläranlage Heringhausen.....	21
Abbildung 9: Gebäude Kläranlage Heringhausen	22
Abbildung 10: Klarwasserabzug im SBR-Becken Kläranlage Heringhausen.....	22
Abbildung 11: CBR-Prinzip	26
Abbildung 12: CBR-Prinzip Kläranlage Granollers ⁵	30
Abbildung 13: CBR-Prinzip zur Fehlererkennung in Pumpstationen ⁶	31
Abbildung 14: Rahmen des Entscheidungsunterstützungssystems ¹⁶	32
Abbildung 15: Anwendung von Bemessung und Simulation	35
Abbildung 16: Dimensionierung und Kapazitätsanalyse mit Simulation ³⁰	36
Abbildung 17: SIMBA#-Kanalnetzmodell KA Heringhausen.....	38
Abbildung 18: SIMBA#- Kläranlagenmodell KA Heringhausen ³⁵	40
Abbildung 19: SIMBA#-Modell der Zyklensteuerung KA Heringhausen ³⁵	41
Abbildung 20: Prinzip des verwendeten biologischen Modells zum Schmutzstoffabbau	42
Abbildung 21: Fallübersicht „KA Heringhausen“ in myCBR ⁴¹	46
Abbildung 22: Similarity Measure Function für das Ähnlichkeitskriterium „Wochentag“ in myCBR ⁴¹	47
Abbildung 23: Similarity Measure Function für das Ähnlichkeitskriterium „Abwassertemperatur“ in myCBR ⁴¹	47

Abbildung 24: Exemplarisches Case Retrieval ⁴¹	48
Abbildung 25: Für den Bediener sichtbares Ergebnis der Datenkommunikation zwischen SCADA und myCBR mit 10 Fällen.....	50
Abbildung 26: Für den Bediener sichtbares Ergebnis der Datenkommunikation zwischen SCADA und myCBR mit 20 Fällen.....	50
Abbildung 27: Entwicklung EW-Belastung KA Heringhausen Zeitraum Juni 2023 bis Mai 2024	52
Abbildung 28: Monatliche EW-Belastung KA Heringhausen Zeitraum Juni 2023 bis Mai 2024	52
Abbildung 29: Frachtband maximale EW-Belastung KA Heringhausen Zeitraum Juni 2023 bis Mai 2024	53
Abbildung 30: Vergleichsanalyse gesamter Energieverbrauch innovative SBR ohne CBR-Steuerung gemäß Energiecheck DWA-A 216	56
Abbildung 31: Vergleichsanalyse Belüftungsenergie innovative SBR ohne CBR-Steuerung gemäß Energiecheck DWA-A 216	56
Abbildung 32: Onlineenergiedaten KA Heringhausen 01.01.2022 – 31.12.2022.....	58
Abbildung 33: Onlineenergiedaten KA Heringhausen 01.01.2023 – 31.12.2023.....	59
Abbildung 34: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Gesamtjahresverbrauch 2022 und 2023	60
Abbildung 35: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Verbrauchsmittelwerte 2022 und 2023	60
Abbildung 36: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Januar 2022	61
Abbildung 37: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Februar 2022.....	62
Abbildung 38: Onlineenergiedaten KA Heringhausen März 2022	63
Abbildung 39: Onlineenergiedaten KA Heringhausen April 2022	64
Abbildung 40: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Mai 2022.....	65
Abbildung 41: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Juni 2022.....	66
Abbildung 42: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Juli 2022.....	67
Abbildung 43: Onlineenergiedaten KA Heringhausen August 2022	68
Abbildung 44: Onlineenergiedaten KA Heringhausen September 2022	69
Abbildung 45: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Oktober 2022.....	70

Abbildung 46: Onlineenergiedaten KA Heringhausen November 2022	71
Abbildung 47: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Dezember 2022	72
Abbildung 48: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Januar 2023	73
Abbildung 49: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Februar 2023	74
Abbildung 50: Onlineenergiedaten KA Heringhausen März 2023	75
Abbildung 51: Onlineenergiedaten KA Heringhausen April 2023	76
Abbildung 52: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Mai 2023.....	77
Abbildung 53: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Juni 2023.....	78
Abbildung 54: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Juli 2023	79
Abbildung 55: Onlineenergiedaten KA Heringhausen August 2023	80
Abbildung 56: Onlineenergiedaten KA Heringhausen September 2023	81
Abbildung 57: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Oktober 2023.....	82
Abbildung 58: Onlineenergiedaten KA Heringhausen November 2023	83
Abbildung 59: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Dezember 2023	84
Abbildung 60: Onlineenergiedaten Monatswerte Gebläsestation KA Heringhausen 2022/2023	86
Abbildung 61: Onlineenergiedaten Monatswerte SBR-Reaktoren KA Heringhausen 2022/2023	87
Abbildung 62: Vergleichsanalyse Energieverbrauch 1.980 EW innovative SBR mit CBR-Steuerung gemäß Energiecheck DWA-A 216	89
Abbildung 63: Vergleichsanalyse Energieverbrauch 3.000 EW innovative SBR mit CBR-Steuerung gemäß Energiecheck DWA-A 216	89
Abbildung 64: CSB-Ablaufwerte KA Heringhausen 01.01.2022 – 31.12.2023.....	91
Abbildung 65: BSB ₅ -Ablaufwerte KA Heringhausen 01.01.2022 – 31.12.2023.....	91
Abbildung 66: NH ₄ -N-Ablaufwerte KA Heringhausen 01.01.2022 – 31.12.2023.....	92
Abbildung 67: N _{ges} -Ablaufwerte KA Heringhausen 01.01.2022 – 31.12.2023.....	92
Abbildung 68: P _{ges} -Ablaufwerte KA Heringhausen 01.01.2022 – 31.12.2023.....	93
Abbildung 69: Verteilung Größenklassen der öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen in Deutschland	100



Abbildung 70: Anzahl der öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen in Deutschland nach
Anlagenart.....101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Leistungsaufstellung Monitoring "Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0".....	15
Tabelle 2: Überwachungswerte für neue Kläranlage (Quelle: Gemeinde Diemelsee)	16
Tabelle 3: Energieberechnung Planungsphase Kläranlage Heringhausen (Quelle: Südwest Consult).....	17
Tabelle 4: Verfügbare Sensoren Kläranlage Granollers	29
Tabelle 5: CBR-Parameter Kläranlage Granollers.....	29
Tabelle 6: CSV-Export der Datenkommunikation zwischen SCADA und myCBR.....	49
Tabelle 7: Energieberechnung Planungsphase Kläranlage Heringhausen für moderne SBR- Anlage (Quelle: Südwest Consult).....	54
Tabelle 8: Energieverbrauchserfassung relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen.....	57
Tabelle 9: Statistik Energieverbrauchserfassung 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	58
Tabelle 10: Statistik Energieverbrauchserfassung 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	59
Tabelle 11: Energieverbrauchserfassung Januar 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	61
Tabelle 12: Energieverbrauchserfassung Februar 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	62
Tabelle 13: Energieverbrauchserfassung März 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	63
Tabelle 14: Energieverbrauchserfassung April 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	64
Tabelle 15: Energieverbrauchserfassung Mai 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	65
Tabelle 16: Energieverbrauchserfassung Juni 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	66
Tabelle 17: Energieverbrauchserfassung Juli 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	67
Tabelle 18: Energieverbrauchserfassung August 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	68

Tabelle 19: Energieverbrauchserfassung September 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	69
Tabelle 20: Energieverbrauchserfassung Oktober 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	70
Tabelle 21: Energieverbrauchserfassung November 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	71
Tabelle 22: Energieverbrauchserfassung Dezember 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	72
Tabelle 23: Energieverbrauchserfassung Januar 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	73
Tabelle 24: Energieverbrauchserfassung Februar 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	74
Tabelle 25: Energieverbrauchserfassung März 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	75
Tabelle 26: Energieverbrauchserfassung April 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	76
Tabelle 27: Energieverbrauchserfassung Mai 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	77
Tabelle 28: Energieverbrauchserfassung Juni 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	78
Tabelle 29: Energieverbrauchserfassung Juli 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	79
Tabelle 30: Energieverbrauchserfassung August 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	80
Tabelle 31: Energieverbrauchserfassung September 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	81
Tabelle 32: Energieverbrauchserfassung Oktober 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	82
Tabelle 33: Energieverbrauchserfassung November 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	83
Tabelle 34: Energieverbrauchserfassung Dezember 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	84
Tabelle 35: Statistik Energieverbrauchserfassung 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen	85

Tabelle 36: Energieverbrauchserfassung Mai bis Oktober 2022 und Mai bis Oktober 2023 Gesamtanlage der KA Heringhausen	88
Tabelle 37: Einzuhaltende Überwachungswerte für Ergebnisvergleich	90
Tabelle 38: Auswertung manuell erfasste Ablaufparameter.....	93
Tabelle 39: Mehrkosten Anpassung Verfahrenstechnik an CBR-System	94
Tabelle 40: Amortisation Mehrkosten CBR zu Energieeinsparung	94
Tabelle 41: Zeitplan Soll-Ist (Quelle: Schlussbericht „Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0“)	95

1. Zusammenfassung

Das im Rahmen des UIP-Förderprogramms „Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0“ erstmals bei einer kommunalen SBR-Kläranlage eingesetzte CBR-Verfahren hat die Erwartungen des Fördervorhabens erfüllt und die gesteckten Ziele einer weitergehenden Energiereduzierung unter Einhaltung der vorgegebenen Reinigungsziele erreicht. Gegenüber konventionellen SBR-Kläranlagen der Größenordnung < 10.000 EW lassen sich mit dem CBR-Softwarebaustein bis zu 70 % Energie einsparen, ohne dass Reinigungswerte zugunsten der Energiereduzierung gefährdet werden. Gezeigt werden konnte auch, dass die SBR-Kläranlagen systemimmanente hohe Prozessflexibilität durch einen CBR-Softwarebaustein nicht beeinträchtigt wird. Die Analyse nach DWAA 216 hat gezeigt, dass die SBR-Kläranlage Heringhausen mit einem CBR-Softwarebaustein zu den besten 5 % an Kläranlagen aller Größenordnungen zählt.

Der praktische Nutzen eines CBR-Softwarebausteins hängt aktuell noch stark vom Erfahrungswert des Anlagenpersonals ab, gerade bei Kläranlagen, die an einem Standort erstmals errichtet werden. Bei fehlenden verwertbaren historischen Daten kommt es auf die Erfahrung des Anlagenpersonals an, alle relevanten Lastfälle zu erfassen und für den CBR-Algorithmus beschreibbar zu machen. Hilfreich ist die Zuhilfenahme von Simulationsmodellberechnungen, die im Fall Heringhausen mit der Software SIMBA# durchgeführt wurden. Bei enger Abstimmung des Anlagenpersonals mit den Modellentwicklern gelingt eine weitestgehend reale Abbildung in Frage kommender Lastfälle.

Das im Rahmen des UIP-Projektes entwickelte CBR-Programm wurde mit dem neuen SCADA-Programm der Kläranlage Heringhausen verbunden. Die aktuellen Zulaufparameter werden in die CBR-Systematik übertragen und es wird überprüft, mit welchem der hinterlegten Lastfälle die aktuelle Zulaufsituation die größten Übereinstimmungen hat. Ist dies identifiziert, kann das Betriebspersonal nach entsprechender Schulung passende Sollwertparameterkombinationen verwenden, um den energieeffizientesten Betrieb unter Einhaltung der Reinigungsziele zu ermöglichen. Aktuell erfolgt die Anpassung der Sollwertparameter noch manuell durch das Anlagenpersonal auf Basis der im SCADA erscheinenden CBR-Ergebnismaske, da die zum Projektbeginn ermittelten Sollwertkombinationen einer längerfristigen Evaluierung durch das Anlagenpersonal bedürfen, diese war nicht Gegenstand der Begutachtung. Danach kann entschieden werden, ob ein (teil-)automatisierter Betrieb erfolgen soll/kann.

Eine besondere Erkenntnis konnte im Zuge des Monitorings festgestellt werden. Durch die frühzeitige Beteiligung des Anlagenpersonals (in Person des ehemaligen Abwassermeisters) erfolgte durch die Auseinandersetzung im Zuge der systemischen Lastfallanalyse ein unbewusstes Training der beteiligten Personen in Bezug auf ein systemisches Analysieren der Abwasserprozesse. Je länger die Personen am Entwicklungsprozess und insbesondere an der Definition der Lastfälle beteiligt waren, desto weniger waren diese Personen auf eine alleinige Analyse der CBR-Systematik angewiesen. Damit konnte gezeigt werden, dass durch die Beteiligung insbesondere von älterem Anlagenpersonal an der Entwicklung von CBR-Lösungen auch jüngere Anlagenbedienstete vom impliziten Wissen der Älteren partizipieren und dieser Prozess eine besondere Form des Wissenstransfer darstellt und die CBR-Systematik eine geeignete Form der Wissenstransferspeicherung darstellt.

2. Hintergrund und Aufgabenstellung

2.1. Ausgangslage

Die Gemeinde Diemelsee führte unter Federführung der Diemelsee Abwasser GmbH im Zeitraum 2018-2022 die Planung, den Neubau und die Einfahrphase der SBR-Kläranlage Heringhausen durch. Der Ortsteil Heringhausen liegt direkt am Stausee Diemelsee in Nordhessen im Landkreis Waldeck-Frankenberg. Der vom Gewässer Diemel gespeiste See hat eine Wasseroberfläche von ca. 1,6 km² und ca. 20 Mio. m³ Speicherraum. Er dient als Stausee, zur Wasserkrafterzeugung und als Ausgleichsbecken / Stauanlage zur Wasserregulierung im Einzugsgebiet der Weser. Darüber hinaus ist der Diemelsee ein beliebtes regionales und überregionales Freizeit- und Erholungsgebiet. Der Ort Heringhausen hat ca. 400 Einwohner. In den Sommermonaten kommen aktuell bis zu 4.000 Übernachtungsgäste und weitere 1.000 Tagesgäste in den Ort. Mit einer weiteren Zunahme, insbesondere an Kurzzeitgästen, ist angesichts des allgemeinen Trends, dass immer mehr Deutsche in Deutschland Urlaub machen, zu rechnen.

Im Zuge der Planung waren besondere Anforderungen bzw. Rahmenbedingungen an eine moderne, innovative und zukunftsfähige Abwasserreinigung zu beachten:

- starke Differenz zwischen Einwohnern und saisonalen Übernachtungs-/Tagungsgästen
- zeitweise spezielle Abwasserzusammensetzung (u a. durch abgestellte Wohnmobile (Stichwort Chemietoilette))
- Besuchsspitzen durch Tagesgäste mit stark verändertem Verhältnis von Kohlenstoff und Stickstoff - einer umweltgerechten, aber dennoch wirtschaftlichen Klärschlammverwertung/-entsorgung unter besonderer Beachtung der Einflüsse aus den Belastungen der Wohnmobilstellplätze (dies bezieht sich auf eine gemeindeweite Klärschlammstrategie, die auch infolge der Aggregation von Mikroplastik in Klärschlamm (95 % Abscheideeffizienz durch Klärschlamm) neu zu bewerten sein wird)
- eine ausreichende Adaptierfähigkeit an zukünftige Tourismusentwicklungen
- eine ausreichende Adaptierfähigkeit an klimawandelbedingte Wetterextreme
- eine ausreichende Adaptierfähigkeit an stark schwankendes Fremdwasseraufkommen sowie
- der besonderen Schutzwürdigkeit des Diemelsee als Wasserspeicher und Freizeitgebiet.

Die neue Kläranlage steht bis heute zudem in doppelter Hinsicht unter besonderer Beobachtung, da es einerseits um den Schutz des Diemelsee und andererseits um einen Ausschluss möglicher Belästigungen der Gäste geht. Ein weiteres Augenmerk musste bei der Gestaltung der neuen Kläranlage auch auf den erwarteten Fachkräftemangel gelegt werden.

Die Gemeinde Diemelsee verfügt bis heute über kein eigenes Personal zur Betreuung der Abwasserinfrastruktur und hat daher seit Jahren die Stadtwerke Brilon mit der Betreuung ihrer Kläranlagen (Adorf, Vasbeck, Giebringhausen sowie Heringhausen) sowie des Kanalnetzes und der zugehörigen Sonderbauwerke betraut. Diese Anlagen sind nicht permanent besetzt und werden von der ca. 20 km entfernten Zentrale der Stadtwerke Brilon aus mit betreut. Eine entsprechende betriebseffiziente Fernüberwachung wurde bei der Neugestaltung entsprechend berücksichtigt. Es waren neue, IT-basierte kooperative Modelle notwendig, um eine sachgerechte Anlagenführung besonders unter den genannten speziellen Rahmenbedingungen sicher zu stellen. Daher wurde neben der Errichtung einer „Kläranlage 4.0“ auch die digitale Einbindung des gesamten Kanalnetzsystems, der zugehörigen Sonderbauwerke sowie der weiteren Kläranlagen der Gemeinde Diemelsee in ein gemeinsames Überwachungs- und Betriebsführungssystem zur Realisierung einer „Abwasserbetriebsführung 4.0“ für die Gemeinde Diemelsee mitberücksichtigt. Hierbei stellte die neu zu errichtende Kläranlage Heringhausen aufgrund der besonderen Zulaufanforderungen durch den Tourismus das Herzstück des Vorhabens dar und wird zukünftig als zentraler Datensammel- und -analyseort fungieren, auf der alle wasserwirtschaftlichen Einrichtungen der Gemeinde zusammenlaufen und die Steuerungszentrale für eine zukunftsfähige, vernetzte Abwasserentsorgung der Gemeinde Diemelsee darstellen.

2.2. Projekt „Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0“

Förderinhalt des im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms des Bundesministeriums für Umwelt- und Verbraucherschutz finanzierten Vorhabens „Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0“ war die Realisierung einer auf den zuvor beschriebenen Rahmenbedingungen ausgerichteten innovativen Elektro- und Maschinenteknik, insbesondere die erstmals eingesetzte Steuerung nach dem sogenannten CBR-Verfahren (Cased Based Reasoning), einer speziellen Anwendung der Künstlichen Intelligenz. Hierzu wurde die neue SBR-Kläranlage Heringhausen mit speziellen „Digitalen Technologien“ für SBR-Anlagen ausgestattet. Hierzu zählten insbesondere

- Gezielte Kontrolle der biologischen Aktivität und Belüftung auf Basis von Echtzeitdaten des biologischen Prozesses (NH_4 , NO_3 , O_2 , TS, etc.), von Kanalnetzdaten sowie Daten aus Sonderbauwerken und dadurch bessere Belüftungsregelung durch Wissen um „echten“ Sauerstoffbedarf infolge besserer Analysetechnik und Datenauswertung auf Basis eines neu entwickelten CBR-Steuerungsalgorithmus
- Ermittlung, Erkennen und Nutzen effizienz- und reinigungsfördernder Prozesseinstellungen (z.B. durch Simulation erfahrungsbasierter Ereignisfälle); die Ergebnisse gehen als Eingangsdaten in den CBR-Steuerungsalgorithmus ein.
- Reduktion unnötiger Überschussschlammproduktion durch Vermeidung von Störfaktoren und Stress für die Bakterien durch vorausschauende Betriebsführung und Prozesskontrolle insbesondere bei Mischwasserzufluss.



- Kontrolle der Zuflussmengen durch vorgeschaltetes Misch- und Ausgleichsbecken und Nutzung des Vorlagespeichers für stoßweise Beschickung sowie
- Einsatz eines innovativen Klarwasserdekanterers mit fein einstellbarem Mengenabfluss und Qualitätskontrolle des Klarwassers.

Ein Kernstück dieses Vorhabens war die erwähnte Case-Based Reasoning (CBR)-Analyse. Dieser innovative Ansatz basiert auf einem prädiktiven – d.h. einem vorausschauenden – Ansatz zur optimierten und energieeffizienten Betriebsführung von SBR-Kläranlagen.

2.3. Aufgabenstellung

2.3.1. Aufgabeninhalt

Mit Datum vom 17.09.2019 erhielt die Gemeinde Diemelsee den Zuwendungsbescheid zum Vorhaben „Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0“ (Aktenzeichen NKa3 – 003470) zum Umweltinnovationsprogramm (UIP).

Gemäß Abschnitt III (Besondere Bedingungen) Nr. 3 (Berichtspflichten) des Zuwendungsbescheids hat der Fördernehmer Gemeinde Diemelsee zum Projektabschluss eine wissenschaftliche Erfolgskontrolle/Messprogramm vorzulegen (im weiteren Monitoring genannt). Mit diesem Monitoring wurde mit Datum vom 13.10.2022 die Hochschule Hof beauftragt. Ausführende Institution ist die Forschungsgruppe Wasserinfrastruktur und Digitalisierung des Instituts für nachhaltige Wassersysteme der Hochschule Hof. Vorgesehen war ein Messzeitraum von 12 Monaten, aufgrund unerwarteter betriebsseitiger Hindernisse endete der Messzeitraum letztendlich am 30.06.2024.

In Abstimmung mit dem UBA wurde ein Messprogramm festgelegt, welches Tabelle 1 zeigt. Darüber hinaus sind in diesem Bericht folgende weitere Punkte enthalten, die gemäß Abschnitt III (Besondere Bedingungen) Nr. 3 (Berichtspflichten) zu beachten sind:

- Relevante Energiedaten aus dem Messzeitraum
- Benennung technischer Schwierigkeiten bei der Projektumsetzung sowie im Zuge des Messprogramms
- Verfahrensfleißbild, Energiebilanz (nach DWA A 216) und Wärmebilanz
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In diesem Monitoringbericht wird vielfach auf den technischen Abschlussbericht des planenden Büros Südwest Consult verwiesen bzw. erforderliche Textpassagen an geeigneter Stelle bzw. zum zugehörigen Kontext des Messprogramms auszugsweise zitiert. Da nicht alle Details des UIP-Projektes im Monitoringbericht vorgestellt werden, ist bei Bedarf ergänzend der technische Abschlussbericht beizuziehen. Das Messprogramm gemäß Tabelle 1 muss vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Anpassungen und Änderungen im Vorhaben „Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0“ bewertet werden (siehe Kapitel 5.2.5).

Tabelle 1: Leistungsaufstellung Monitoring "Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0"

Leistungsaufstellung Monitoring "Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0"		
Stand: 16.09.2022, abgestimmt mit UBA		
Pos.	Leistung	Beschreibung
1.	Analyse Betriebsdaten seit Inbetriebnahme	Zusammenstellung und Bewertung der seit der Inbetriebnahme erfassten Daten: - Zulaufparameter (CSB, BSB, NH4, P, pH, Menge) - Biologie (NH4, NO3, O2, T) - Ablaufparameter (CSB, BSB, NH4, NO3, Nges, P, pH, Trübung, Menge) - Energieverbräuche - Fällmittelverbräuche
2.	Soll-Ist-Vergleich Energie	Soll-Ist-Vergleich Energieverbräuche für die real erfassten Lastfälle auf Basis DWA A 216
3.	Datenzuordnung Lastfälle	Zuordnung der Betriebsdaten aus Pos. 1 zu den 20 Lastfällen der Lastfallanalyse
4.	Bewertung Lastfälle	Analyse der Betriebsdatenzuordnung zu den Lastfällen und Priorisierung in Bezug auf Anlagenperformance und Energieverbrauch
5.	Messkampagne	Begleitende Messkampagne über 1 Jahr zur Erfassung aller Jahreszeiten in Form von Labordatenauswertung und ergänzenden Onlinesensoren. Neben der weiteren Erfassung der Betriebsparameter gem. EKVO sollen insbesondere erweiterte temporäre Messkampagnen für die Top 5 Lastfälle durchgeführt werden: - Zulaufparameter (CSB (über SAK-Online), BSB (wöchentlich), NH4 (täglich, in Wechselphasen 2h-Mischprobe), P (täglich, in Wechselphasen 2h-Mischprobe), pH, Menge (Online) - Biologie Online (NH4, NO3, O2, T) Schlamm bild für Top 5 Lastfälle (gemäß Priorisierung) - Ablaufparameter (CSB ((täglich, in Wechselphasen 2h-Mischprobe; bei Bedarf Kampagne mit SAK-Sonde aus Zulauf), BSB(wöchentlich), NH4 (Online bei Klarwasserabzug), NO3 (Online bei Klarwasserabzug), Nges (täglich), P (täglich), pH (Online wird ergänzt), Trübung (Online), Menge (Online)) - Energieverbräuche (digital) - Fällmittelverbräuche (Betriebstagebuch, Hochrechnung aus Pumpenlaufzeit) - Erfassung der Mengen- und Energiedaten der Außenstationen
6.	Simulationsanalyse Außenstationen	Durchführung von Simulationsdurchläufen mit vorhandenem SIMBA-Modell zur Ermittlung des Verhaltens der Außenstationen bei Auftreten der 20 Lastfälle
7.	Auswertung Ergebnisse	Auswertung der Ergebnisse der Messkampagne, sowie der Simulationsanalyse der Außenstationen zur Überprüfung der Ergebnisse mit den Zielwerten des Antrags.
8.	Abschlussbericht	Erstellung Abschlussbericht

2.3.2. Aufgabenziele

Im der Projektbeschreibung zum Antrag wurden folgende Aufgabenziele formuliert:

„Neben der Verwendung von Maschinen und EMSR-Elementen nach dem Stand der Technik unter Beachtung der einschlägigen Vorschriften sollen insbesondere moderne Steuerungselemente zur Erhöhung der Betriebssicherheit und Verbesserung der Betriebseffizienz eingesetzt werden. Darüber hinausgehend sollen in Heringhausen erstmalig bei der Betriebsführung einer Kläranlage die erwarteten Tourismusdaten in Kombination mit Niederschlagsprognosen in den Steuerungskonzeptionen Berücksichtigung finden. Die Abwasserreinigung wird damit über den Stand der Technik und die allgemein gültigen Anforderungen hinausgehen. So werden die gesetzlich zu erfüllenden Anforderungen unterschritten, die Vorfluter entlastet und somit die Umwelt geschont. Gleichzeitig wird eine hohe Betriebseffizienz auch bei in der Vergangenheit kritischen Betriebszuständen wie z.B. Unterlast außerhalb der Tourismussaison erreicht“.

Im Mittelpunkt stand die Zielerreichung durch Implementation einer neuartigen Fallanalyse mittels Case-Based-Reasoning (CBR, siehe Kapitel 4). Ursprünglich war die Integration des Kanalnetzes der Gemeinde Diemelsee am Standort Heringhausen in die Fallanalyse per CBR vorgesehen. Ebenso sollte eine neuartige Belüftungstechnologie die Energieeffizienz verbessern. Beides konnte nicht realisiert werden, näheres dazu in Kapitel 5.2.2.2 bzw. im technischen Abschlussbericht.

Für die Bewertung der Monitoringergebnisse sind die zu erreichenden Ablaufwerte gemäß Tabelle 2 (Zielwerte der Reinigungsfähigkeit des SBR-Prinzips) und die erreichten Energieeinsparungen gegenüber Standardanlagen maßgebend. Für die Vergleichsdaten des Energieverbrauchs von Standardanlagen wurde auf die Planungsdaten der Gemeinde Diemelsee zurückgegriffen (siehe Tabelle 3) sowie die Vergleichsdaten des Energiechecks gemäß DWA-A 216 (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2) durch eine eigens erstellte Energieanalyse nach DWA-A 216 in Bezug zu den Monitoringergebnissen gesetzt. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5 dargestellt.

Tabelle 2: Überwachungswerte für neue Kläranlage (Quelle: Gemeinde Diemelsee)

Parameter	Grenzwert	Einheit
CSB	30	mg/l
BSB ₅	8	mg/l
NH ₄ -N	5	mg/l
N _{ges}	15	mg/l
P _{ges}	0,7	mg/l
Intestinale Enterokokken	400	KBE/100 ml
Escherischia coli	1000	KBE/100 ml

Tabelle 3: Energieberechnung Planungsphase Kläranlage Heringhausen (Quelle: Südwest Consult)

Lf. Nr. / R#i	Funktion		Leistung / Aggregat			Wirtschaftlichkeit		
	LV Pos. (M-Maschine - E-EDSR)	Aggregat	Leistung in kW	Wirkungsgrad (coef)	Stromaufnahme in A	Laufzeit pro Tag in Stunden	Energiebedarf pro Tag in kWh	Energiebedarf pro Jahr
Aggregategruppe: 1.01 - Pumpwerk Prov.								
Niveau Vorschacht		A-NID	0,02	0,80	0,20	24,00	0,48	0,00
Pumpe 1		M-SA	9,00	0,80	34,10	7,00	63,00	22.995,00
Pumpe 2 (Reserve)		M-SA	9,00	0,80	34,10	7,00	63,00	22.995,00
Aggregategruppe: 01.2 - Mechanische Reinigung								
Zulauf MID		A-DF	0,10	0,00	1,00	24,00	2,40	876,00
Differenzm. Vor dem Rechen		A-NIU	0,10	0,00	1,00	24,00	2,40	876,00
Differenzm. Vor dem Rechen		A-NIU	0,00	0,00	0,00	24,00	0,00	0,00
Rechen - Antrieb		M-DI	1,50	0,80	3,10	3,00	4,50	1.642,50
Rechengut Waschpresse		M-DI	2,50	0,80	5,50	3,00	7,50	2.737,50
Rechen - Mag. Ventil Spülung 1		M-VE	0,20	0,80	1,00	0,25	0,05	18,25
Rechen - Mag. Ventil Spülung 2		M-VE	0,20	0,80	1,00	0,25	0,05	18,25
Bodenförderer Sandaustag		M-DI	0,55	0,80	1,60	3,00	1,65	602,25
Raumventilator		M-DI	0,58	0,80	1,30	3,00	1,74	635,10
Kombinierte H2S/CH4-Messung		A-NID	0,20	0,80	2,00	24,00	4,80	1.752,00
Aggregategruppe: 01.03 - Sandfang								
Sandklassierer		M-DI	0,75	0,80	2,10	3,00	2,25	821,25
Sandfang Belüftung		M-DI	0,55	0,80	2,20	3,00	1,65	602,25
Sandfang Belüftung Mag. Ventil		M-VE	0,20	0,80	1,00	0,25	0,05	18,25
Sandfang - Kompressor		M-DI	2,20	0,80	3,97	24,00	52,80	19.272,00
Sandfang - Förderpumpe		M-DI	1,30	0,80	2,80	3,00	3,90	1.423,50
pH Messung		A-AV	0,02	0,20	24,00	0,48	175,20	
Fettfangpumpe		M-DI	0,18	0,75	2,25	3,00	0,54	197,10
Fettfangkompressor		M-DI	1,50	0,80	5,00	3,00	4,50	1.642,50
Aggregategruppe: 01.04 - MAB								
MAB - Füllstandsmessung		A-NID	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
MAB - Pumpe 1		M-SA	9,00	0,80	34,10	8,00	72,00	26.280,00
MAB - Pumpe 2		M-SA	9,00	0,80	34,10	8,00	72,00	26.280,00
MAB - Rührwerk		M-SI	3,50		8,00			
Aggregategruppe: 01.05 - SBR 1								
SBR 1 - Füllstandsmessung		A-NID	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
SBR 1 - O2-Messung		A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
SBR 1 - Temperatur Messung		A-AYS	0,00		0,00	24,00	0,00	0,00
SBR 1 - NH4 Messung		A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
SBR 1 - NO3 Messung		A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
SBR 1 - TS Messung		A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
SBR 1 - Trübungs-Messung		A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
SBR 1 - Druckentlastungsventil (Belüfterplatten)		M-VE	0,10	0,80	0,20	0,25	0,03	9,13
SBR 1 - Absperrklappe O2 Zufuhr		M-SI	0,35		1,40	0,25	0,09	31,94
SBR 1 - ÜS Pumpe		M-DI	2,65	0,80	6,90	1,00	2,65	967,25
SBR 1 - Rührwerk 1		M-DI	2,70	0,80	3,00	2,00	5,40	1.971,00
SBR 1 - Rührwerk 2		M-DI	2,70	0,80	3,00	2,00	5,40	1.971,00
SBR 1 - Hydroklar Dekanter		M-SI	0,37	0,70	1,60	0,50	0,19	67,53
Aggregategruppe: 01.6 - SBR 2								
SBR 2 - Füllstandsmessung		A-NID	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
SBR 2 - O2-Messung		A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
SBR 2 - Temperatur Messung		A-AYS	0,00		0,00	24,00	0,00	0,00
SBR 2 - NH4 Messung		A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
SBR 2 - NO3 Messung		A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
SBR 2 - TS Messung		A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
SBR 2 - Trübungs-Messung		A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
SBR 2 - Druckentlastungsventil (Belüfterplatten)		M-VE	0,10	0,80	0,20	0,25	0,03	9,13
SBR 2 - Absperrklappe O2 Zufuhr		M-SI	0,35		1,40	0,25	0,09	31,94
SBR 2 - ÜS Pumpe		M-DI	2,65	0,80	6,90	1,00	2,65	967,25
SBR 2 - Rührwerk 1		M-DI	2,70	0,80	3,00	2,00	5,40	1.971,00
SBR 2 - Rührwerk 2		M-DI	2,70	0,80	3,00	2,00	5,40	1.971,00
SBR 2 - Hydroklar Dekanter		M-SI	0,37	0,70	1,60	0,50	0,19	67,53
Aggregategruppe: 01.07 - Gebläse								
Gebläse 1		M-FU	15,00	0,80	30,00	14,00	210,00	76.650,00
Gebläse 2		M-FU	15,00	0,80	30,00	14,00	210,00	76.650,00
Druckmessung Hauptleitung Belüftung		A-DR	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
Gebläseraum - Thermostat		A-KO	0,00	0,70	0,10	24,00	0,02	8,76
Gebläseraum - Ventilator		M-DI	0,14	0,70	0,35	1,00	0,14	51,10
Temperatur - Innen		A-TEM	0,00	0,70	0,10	24,00	0,02	8,76
Temperatur - Außen		A-TEM	0,00	0,70	0,10	24,00	0,02	8,76
Aggregategruppe: 01.08 - Schlammbehälter								
Schlammbehälter - Füllstand		A-NID	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
Schlammbehälter - Rührwerk 1		M-SA	4,50	0,80	9,40	1,00	4,50	1.642,50
Schlammbehälter - Rührwerk 2		M-SA	4,50	0,80	9,40	1,00	4,50	1.642,50
Schlammbehälter - Trübwasserpumpe		M-DI	2,00	0,80	3,65	1,00	2,00	730,00
Aggregategruppe: 1.10 - P-Füllung								
Füllmittelstation - Leckage		A-KO	0,02		0,20	0,00	0,00	0,00
Füllmittelstation - Grenzscharer Max		A-KO	0,02		0,20	0,00	0,00	0,00
Füllmittelstation - Grenzscharer Min		A-KO	0,02		0,20	0,00	0,00	0,00
Füllmittelstation - Grenzscharer MiniMin		A-KO	0,02		0,20	0,00	0,00	0,00
Füllmittelstation - Dosierpumpe		M-DI	0,50	0,80	1,00	6,00	3,00	1.095,00
Aggregategruppe: 01.11 - UV Anlage								
Versorgung UV Anlage		LS-AG	2,00	0,70	4,13	6,00	12,00	4.380,00
Durchfluss Auslauf		A-AV	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20
Stationärer Probennehmer		A-AV	1,00		4,35	24,00	24,00	8.760,00
Aggregategruppe: 01.12 - Brauchwasser								
Brauchwasserpumpe (mind. Druck 8 bar)		M-DI	3,70	0,80	9,00	6,00	22,20	8.103,00
Druckschalter Brauchwasserpumpe		A-KO	0,05		0,20	24,00	1,20	438,00
Aggregategruppe: 01.13 - Gebäude Technik								
Licht und Steckdosen								
Rechengebäude - Licht + Steckdosen		INST	INST	0,50	2,17	1,00	0,50	182,50
Rechengebäude - Elektro Heizung		INST	INST	3,00	13,04	0,50	1,50	547,50
Rechengebäude - E Elektrans		INST	INST	2,00	8,70	1,00	2,00	730,00
SBR - Licht + Steckdosen		INST	INST	0,50	2,17	1,00	0,50	182,50
SBR - Elektro Heizung		INST	INST	3,00	13,04	0,50	1,50	547,50
SBR - E Elektrans		INST	INST	2,00	8,70	1,00	2,00	730,00
Außenbeleuchtung		INST	INST	3,00	13,04	0,50	1,50	547,50
Allgemein - Sonstiges								
Lastabgang Klima Anlage		EIGEN	3,00	0,80	13,04	14,00	42,00	15.330,00
			0,00		0,00	24,00	0,00	0,00
			0,00		0,00	24,00	0,00	0,00
Anschlussleistung [kW]			113,46					
Energieverbrauch pro Tag [kWh/d]					314,51		546,55	343.664,66

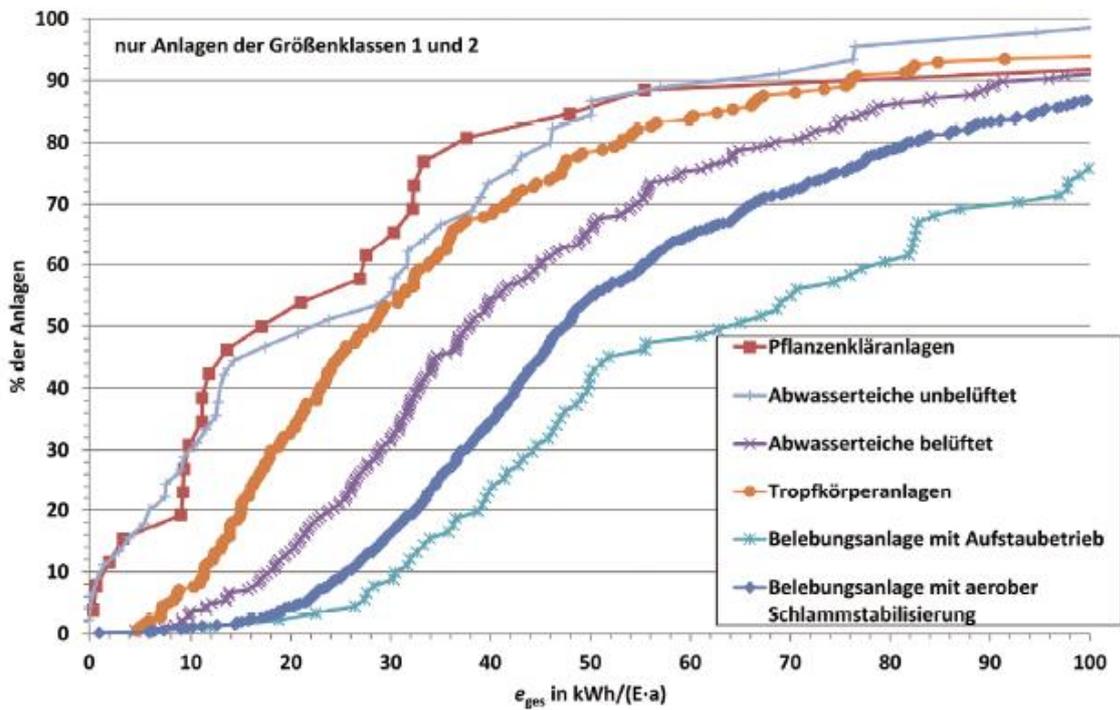


Abbildung 1: Spezifischer Gesamtstromverbrauch in Abhängigkeit vom Reinigungsverfahren (Quelle: DWA-A 216)

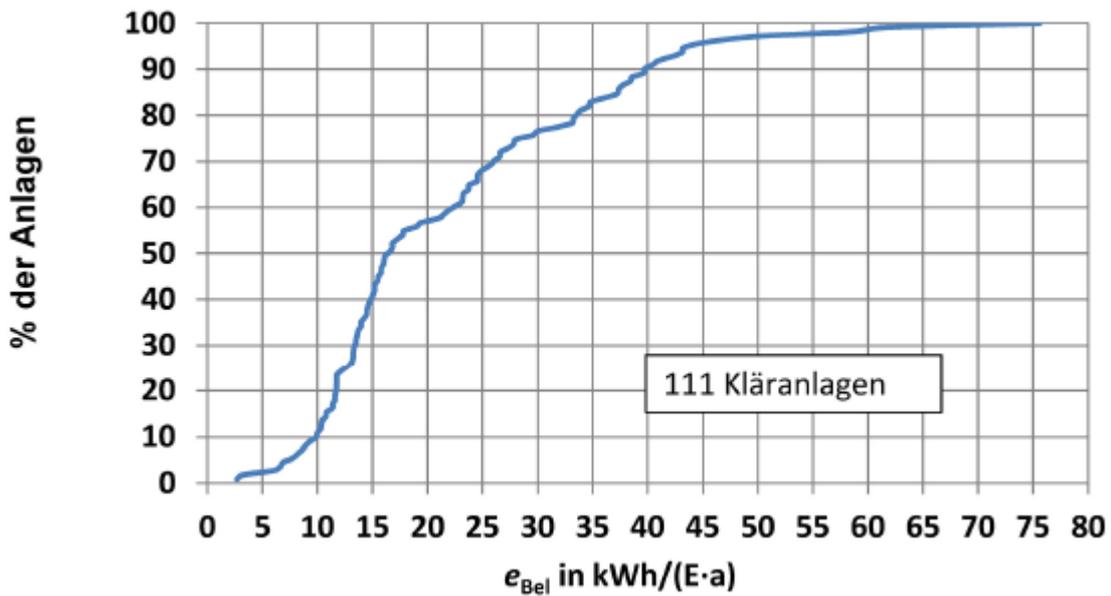


Abbildung 2: Spezifischer Stromverbrauch für die Belüftung e_{Bel} der Kläranlagen (Quelle: DWA-A 216)

3. Technische Beschreibung der Kläranlage Heringhausen

3.1. Realisiertes Verfahrenskonzept

Gebaut wurde die Kläranlage Heringhausen als SBR-Anlage mit 1.980 EW. Das Konzept ist in nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

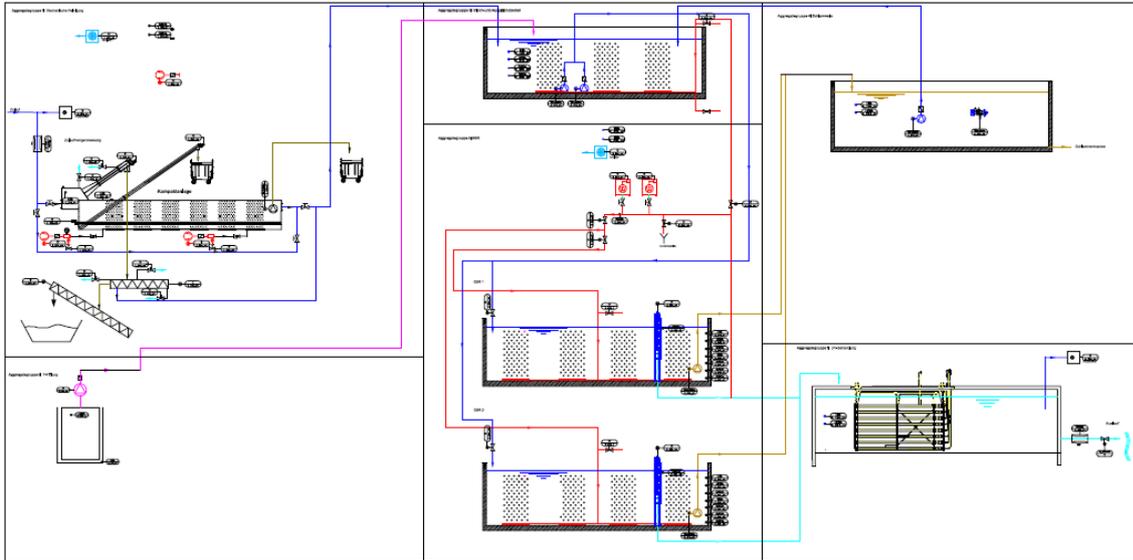


Abbildung 3: R&I-Verfahrensfließbild SBR-Anlage Heringhausen

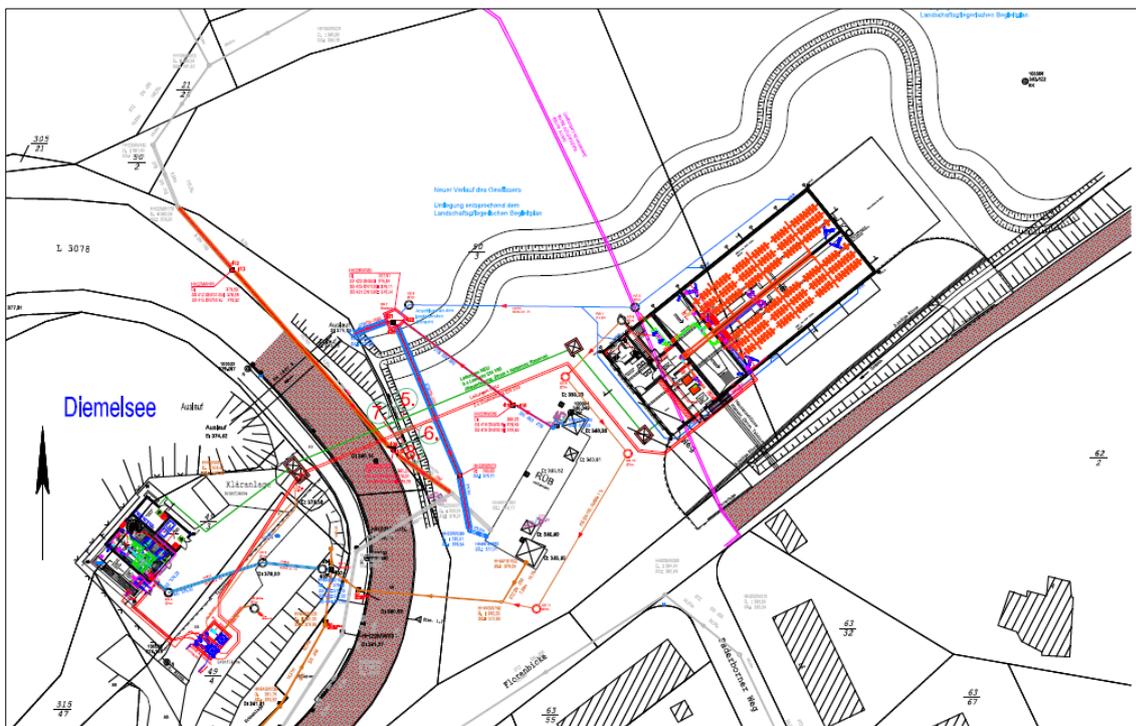


Abbildung 4: Lageplan SBR-Anlage Heringhausen

Die mechanische Reinigung wurde auf dem Gelände der vorhandenen Kläranlage errichtet, um hydraulische Vorteile aufgrund der geografischen Gegebenheiten zu nutzen, so kann das Abwasser weiterhin im freien Gefälle die erste Reinigungsstufe durchfließen. Das bisherige Schlamm-silo wird zum Misch- und Ausgleichsbecken umgestaltet. Abbildung 5 zeigt die vorgesehene Umgestaltung des Kombibeckens.

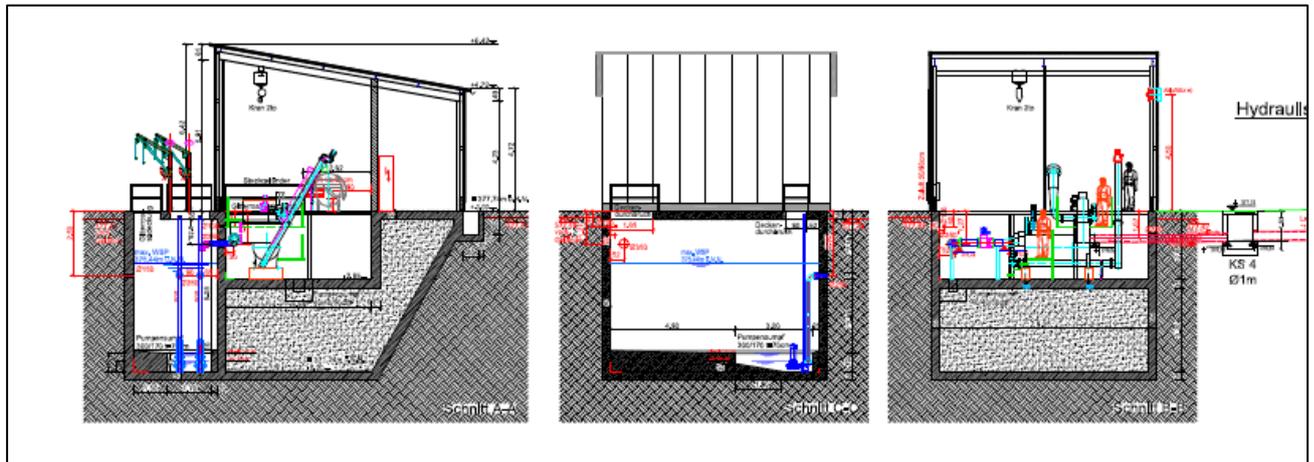


Abbildung 5: Darstellung mechanische Reinigung und MAB der SBR-Anlage Heringhausen

Das vorhandene Regenüberlaufbecken bleibt in seiner Funktion erhalten und wurde steuerungstechnisch in das neue Konzept integriert. Abbildung 6 zeigt den ausgeführten Neubau als SBR-Verfahren. Abbildung 7bis Abbildung 10 zeigen die ausgeführte Kläranlage.

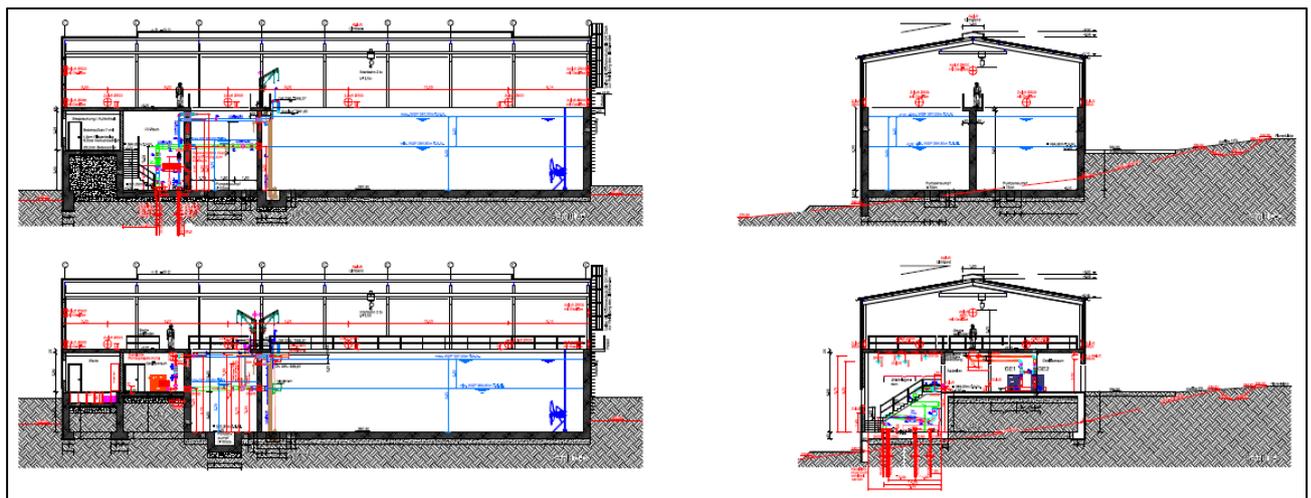


Abbildung 6: Darstellung Maschinenhaus und SBR-Reaktoren der SBR-Anlage Heringhausen



Abbildung 7: SBR-Becken in Halle Kläranlage Heringhausen



Abbildung 8: Schlamm-speicher in Halle Kläranlage Heringhausen



Abbildung 9: Gebäude Kläranlage Heringhausen



Abbildung 10: Klarwasserabzug im SBR-Becken Kläranlage Heringhausen

3.2. Modellhafter Neuheitswert

3.2.1. Biologische Abwasserbehandlung mit SBR-Verfahren

SBR-Verfahren sind im Vergleich zu einer konventionellen kontinuierlich durchflossenen Anlage extrem flexibel, auch für Mischwasserzufluss¹. Je nach Randbedingungen und Daten-/Messtechnik können bestehende Reserven innerhalb eines Prozessschrittes für andere Prozessschritte genutzt werden. Z.B. kann bei entsprechenden Randbedingungen die erforderliche Dauer für die biologische Reinigung verkürzt werden, um im Falle sich verschlechternder Schlammigenschaften die Sedimentationszeit zu verlängern oder auch umgekehrt. Eine solch flexible Aufteilung zwischen biologischer Reinigungsstufe und Sedimentation ist beim konventionellen Belebtschlammverfahren in der Nachklärung nicht möglich.

Das SBR-Verfahren weist gegenüber einer kontinuierlich durchflossenen Anlage verschiedene verfahrenstechnische Besonderheiten auf. Verfahrenstechnisch und Reaktionskinetisch bestehen auch bei unterschiedlichen SBR-Anlagen die größten Unterschiede zwischen Anlagen, die über einen langen Zeitraum befüllt werden und solchen, die stoßweise innerhalb kurzer Zeit aus einer Vorlage beschickt werden. Der verfahrenstechnische Vorteil des SBR-Verfahrens kommt erst bei Stoßbeschickung voll zum Tragen, insbesondere bezüglich der Stickstoff- und Phosphorelimination, aber auch bezüglich verbesserter Schlammabsetzeigenschaften (ISV). Dieser Vorteil kann umso mehr genutzt werden, je besser die Kenntnis über den aktuellen Prozesszustand in Echtzeit ist, diese Information kann gleichzeitig für eine bessere Energieeffizienz unter Beibehalt der erforderlichen Reinigungsleistung genutzt werden. Da die Bemessung der Kläranlage Heringhausen nach den gültigen Bemessungsregeln erfolgte (DWA A 131 und M 210), wurden die gleichen Randbedingungen und Bemessungsparameter angesetzt wie bei einer kontinuierlich durchflossenen Anlage. Durch die Berücksichtigung der vorteilhaften Stoßbeschickung weist eine SBR-Anlage meist deutliche Reserven auf, was besonders bei touristisch geprägten Zuflussbedingungen vorteilhaft ist². Diese Reserven lassen sich bei flexibler Steuerung und Regelung der Zyklen, der Zusammensetzung und Dauer der Zyklusphasen, dem Einsatz einer modernen dynamischen Steuerung, einem frei regelbaren Klarwasserabzug und bei Variation des Austauschvolumens in Abhängigkeit von den aktuellen Randbedingungen hervorragend nutzen. In der Vergangenheit lagen die Grenzen der optimalen Reservenutzung in der eingeschränkten Daten- und Messtechnik sowie eingeschränkten Steuerungsalgorithmen.

Deutliche Vorteile zeigt das SBR-Verfahren speziell im Bereich der Stickstoffelimination. Dies ist angesichts der zu erwartenden hohen Anzahl an Tagesgästen in Saisonspitzenzeiten von besonderer Bedeutung, denn hier fallen vergleichsweise hohe Konzentrationen an Ammonium an. Die Denitrifikation nach Abwasserstoß ist am ehesten zu vergleichen mit der vorgeschalteten Denitrifikation.

¹ Wiese, J. (2004): Entwicklung von Strategien für einen integrierten Betrieb von SBR-Kläranlagen und Mischkanalisationen. Dissertation Technische Universität Kaiserslautern

² Steinmetz, H. (2001): Bemessung von SBR-Anlagen. In: Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, Band 14.

Aufgrund des günstigen C:N-Verhältnisses ergeben sich jedoch größere Umsatzgeschwindigkeiten im SBR-Reaktor als bei einer konventionellen Belebungsanlage, was beim SBR letztlich zu höheren Volumenreserven führt, so dass bei Belastungsstößen im Gegensatz zu einer konventionellen Abwasseranlage eine Verschlechterung der Ablaufwerte vermieden werden kann. Die Denitrifikation bei SBR-Anlagen verläuft mit Stoßbeschickung schneller als bei einer Durchlaufanlage, was durch Erfahrungen im Betrieb von SBR-Anlagen als auch durch theoretische Grundlagen gestützt ist. Die durch den Abwasserstoß bedingte hohe Anfangskonzentration an BSB/CSB im Reaktor führt um bis zu 50 %³ höheren Stoffumsatzgeschwindigkeiten als bei Durchlaufanlagen. Betriebserfahrungen von SBR-Anlagen mit Stoßbeschickung⁴ zeigen weiterhin, dass i.d.R. sehr hohe P-Eliminationsraten erreicht werden. In der Regel werden über 80 % des Phosphors durch Bio-P eliminiert, so dass der Fällmitteleinsatz sehr stark minimiert werden kann. Aufgrund des systembedingt geringen Einsatzes an Fällmitteln konnte auf eine Einflussanalyse des Fällmittelverbrauchs auf den Energieverbrauch, wie in Punkt 1 Tabelle 1 aufgeführt, verzichtet werden, da hier keine verwertbaren Aussagen zu erwarten waren.

Aus den vorgenannten Gründen wurde für die neue Kläranlage Heringhausen das SBR-Verfahren ausgewählt.

Die vorgenannten Vorteile eines SBR-Prozesses lassen sich vollständig nur mit moderner Daten- und Messtechnik sowie darauf abgestimmter Prozesssteuerung optimal nutzen. Dabei muss das ausgewählte System die lokalen Betriebsbesonderheiten, z.B. saisonale Einflüsse durch Tourismus, Niederschlag, Temperatur erkennen und adäquat in den Algorithmen verarbeiten.

Die im Antrag zur UIP-Förderung mehrfach erwähnte und als Projektanteil vorgesehene Integration des Zulaufkanals in die Steuerung konnte im Verlauf des Vorhabens nicht berücksichtigt werden, da die Sanierung von Sonderbauwerken des Heringhausener Kanals mit der Installation moderner Sensor- und Maschinenteknik aufgrund fehlender finanzieller Mittel nicht rechtzeitig begonnen werden konnte. Ob und in welcher Form die erforderliche maschinen- und messtechnische Sanierung und die zugehörige Integration des Zulaufkanals in die Steuerung realisiert wird, stand zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch nicht fest.

3.2.2. Innovative Steuerung und Netzbewirtschaftung mit CBR-Prinzip

Die neue SBR-Kläranlage Heringhausen wurde mit speziellen „Digitalen Technologien“ für SBR-Anlagen ausgestattet, die z.B. das Ergebnis des BMWi-Fördervorhabens KOMMUNAL 4.0 (www.kommunal4null.de) waren. Hierzu zählten insbesondere

- Gezielte Kontrolle der biologischen Aktivität und Belüftung auf Basis von Echtzeitdaten des biologischen Prozesses (NH₄, NO₃, O₂, TS etc. und dadurch bessere Belüftungsregelung durch Wissen um „echten“ Sauerstoffbedarf infolge besserer Analysetechnik und Datenauswertung auf Basis eines neuartigen CBR-Steuerungsalgorithmus.

³ Kayser, R. (1995): „Bemessung von Belebungsanlagen im Aufstaubetrieb“, in: Das Gas-Wasserfach, Heft 12, S 625-627

⁴ Gemäß Erfahrungsberichten Südwest-Consult



- Reduktion unnötiger Überschussschlammproduktion durch Vermeidung von Störfaktoren und Stress für die Bakterien durch vorausschauende Betriebsführung und Prozesskontrolle insbesondere bei Mischwasserzufluss.
- Einsatz eines innovativen Klarwasserdekanterers mit fein einstellbarem Mengenabfluss.
- Kontrolle der Zuflussmengen durch vorgeschaltetes Misch- und Ausgleichsbecken und Nutzung des Vorlagespeichers für stoßweise Beschickung.
- Sammlung, Erkennen und Nutzen effizienz- und reinigungsfördernder Prozesseinstellungen; die Ergebnisse gehen als Eingangsdaten in den CBR-Steuerungsalgorithmus ein.
- Vorausgehende Anlagensimulationen auf Basis von SIMBA#; hier wurden verschiedene Lastfälle (Saison, Nicht-Saison, Tagesgäste etc.) ermittelt und Daten für die Bereitstellung für den CBR-Steuerungsalgorithmus erzeugt.

Kernstück des Vorhabens "Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0" ist eine Case-Based Reasoning (CBR)-Prognose. Dieser innovative Ansatz basiert auf einem prädiktiven – d.h. einem vorausschauenden – Ansatz zur optimierten und energieeffizienten Betriebsführung von SBR-Kläranlagen.

Das Cased Based Reasoning befasst sich mit einem sehr aktuellen Problem im Bereich der Künstlichen Intelligenz, und zwar mit der Entwicklung intelligenter (Experten-) Entscheidungsunterstützungssysteme, insbesondere in Echtzeit (real-time-ISEUS), die auf offene und dynamische Themenbereiche ausgerichtet sind. Es ist ein Ansatz, der es ermöglicht, ein neues, unbekanntes Problem zu lösen, indem man die Lösung eines bereits bekannten Problems verwendet oder anpasst, d.h. bereits gesammelte Erfahrungen bei der Lösung ähnlicher Situationen nutzt. Solche Systeme beruhen auf der Integration von Modellen zur Anpassung, Änderung und zum Erlernen der Wissensdarstellung und der Funktionsweise, die sich an den Besonderheiten des Problem- (Sach-)bereichs und der entsprechenden Art der Ungewissheit orientieren, was ihre Fähigkeit zur Entwicklung und Veränderung ihres Zustands widerspiegelt. Leider sind die meisten praktischen Probleme, die sich auf offene und dynamische Themenbereiche beziehen, schlecht formalisiert, und die Ungewissheit kann nicht-probabilistischer Natur sein. Bei der Suche nach einer Lösung für solche Probleme ist es notwendig, plausible Inferenzmethoden anzuwenden, die es ermöglichen, eine akzeptable (möglicherweise nicht optimale) Lösung zu finden. Ein Ansatz beruht auf der Tatsache, dass es für eine Person (Experte) charakteristisch ist, in der ersten Phase nach einer Lösung für ein neues (unbekanntes) Problem zu suchen, Lösungen zu verwenden, die bereits in ähnlichen Fällen gefunden wurden, und diese gegebenenfalls an das Problem (die aktuelle Problemsituation) anzupassen. Dieser erfahrungsbasierte Ansatz bildet die Grundlage für die Modellierung von Argumentationsmethoden auf der Grundlage von Präzedenzfällen. Für den Fall Heringhausen erscheint diese Form der Vorhersageanalyse das passende Mittel zu sein. Die wesentlichen Herausforderungen bestand darin, die relevanten Präzedenzfälle zu finden, technisch ausreichend zu beschreiben und das System für neue, noch nicht bekannte Fälle offen und anpassbar zu gestalten. Sobald die erforderlichen Fallbeschreibungen in der notwendigen Informationsqualität vorliegen, ist die Gestaltung mit dem CBR das vergleichsweise kleinere Problem.

Auf Kläranlagen und in vorgelagerten Kanalnetzen, die den modernen Grundsätzen der Digitalisierung entsprechen, werden die zuvor beschriebenen Messwerte in Echtzeit erfasst, hinzukommen zahlreiche Laboranalysen.

Die Vorteile von CBR liegen u.a. in der hohen Geschwindigkeit und Transparenz, in einer Reduzierung des Akquisitionsaufwands für Wissen und einer einfachen Wartung des Wissens sowie einer effektiveren Nutzung vorhandener Datenbestände (Abbildung 11).

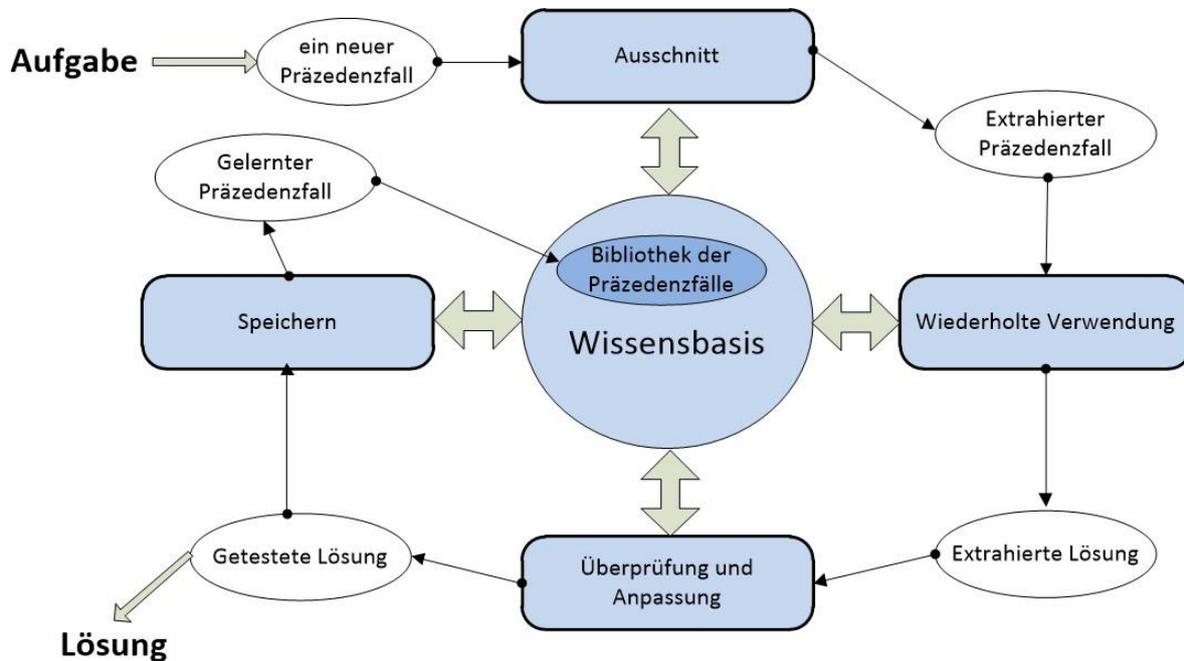


Abbildung 11: CBR-Prinzip⁵

Die Auswahl des CBR-Verfahrens für eine KI-basierte Entscheidungshilfe in der Abwassertechnik gegenüber Verfahren, die eine hohe Datendichte und umfangreiche Datenhistorie benötigen, liegt in den systembedingten Vorteilen des CBR:

- die Möglichkeit, die auf Basis einmal gesammelten Erfahrungen des Betriebspersonals, die in entsprechenden Lastfalldefinitionen überführt sind, direkt zu nutzen, ohne dass für neue oder unklare Situationen ein Experte für ein bestimmtes Fachgebiet hinzugezogen werden muss;
- die Möglichkeit, die Lösungszeit zu verkürzen, indem eine bereits vorhandene Lösung für ein ähnliches Problem verwendet wird;
- die Möglichkeit, die wiederholte Erlangung einer fehlerhaften Lösung auszuschließen;
- keine Notwendigkeit für ein gründliches Studium und die Nutzung des gesamten verfügbaren Wissens über das Fachgebiet, da nur die wesentlichen Merkmale (in diesem Fall relevanten Parameter und Zustandsbeschreibungen) des Fachgebiets berücksichtigt werden können;

⁵ Aamodt, A. und Plaza, E. [1994]: Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches, AI Communications, Vol. 7, Nr. 1, pp. 39-59, IOS Press

- die Möglichkeit, Heuristiken zu verwenden, die die Effizienz des Lösungsfindungsprozesses erhöhen.

Das CBR-Verfahren ist generell auch für laienhafte (grobe) Lastfallbeschreibungen geeignet. Wird es in der Abwasserwirtschaft verwendet, muss aufgrund der komplexen Anforderungen darauf geachtet werden, dass die Lastfallbeschreibungen so exakt und so nah an der Realität wie möglich sein, um vor dem Hintergrund möglicher Umweltauswirkungen negative Folgen zu vermeiden.

3.2.3. *Stand der Technik und Wissenschaft zum Einsatz von CBR in der Wasserwirtschaft*

Seit den 1980er Jahren wurden verschiedene Arten von CBR-Systemen mit unterschiedlichen Denkmechanismen entwickelt⁶. In den letzten zehn Jahren wurden CBR und seine relevanten Techniken auf vielfältige Weise eingesetzt, unter anderem im Produktdesign⁷, in der Krankheitsdiagnose⁸, in der Fehlerdiagnose⁹, in der intelligenten Steuerung¹⁰ und in der numerischen Vorhersage¹¹.

Die Verwendung von Informationen bekannter historischer und immer wiederkehrender Fälle mit CBR-Ansätzen werden in der Abwassertechnik seit rund zwei Jahrzehnten untersucht (z.B.^{12, 13}). Kombinationen mit Neuronalen Netzen und Fuzzy Logic wurden ebenfalls vorgenommen¹⁴. Die Anwendungen beschränkten sich aber oftmals auf Einzelfragen wie z.B. das Erkennen von ungewollten Mikroorganismen¹⁵, der Entfernung von Stickstoff¹⁶ (Quan, 2018), zur Vorhersage von Pumpenausfällen¹⁷ oder als Hilfe beim Monitoring von Kläranlagen¹⁸.

⁶ Kolodner J (1993) Case-based reasoning. Morgan Kaufmann Publishers Inc, San Francisco

⁷ Kwong CK, Tam SM (2002) Case-based reasoning approach to concurrent design of low power transformers. J Mater Process Technol 128:136–141

⁸ Saraiva R, Perkusicha M, Silva L (2016) Early diagnosis of gastrointestinal cancer by using case-based and rule-based reasoning. Expert Syst Appl 61:192–202

⁹ Yang BS, Han T, Kim YS (2004) Integration of ART-Kohonen neural network and case-based reasoning for intelligent fault diagnosis. Expert Syst Appl 26:387–395

¹⁰ Yan A, Chai TY, Yu W, Xu Z (2012) Multi-objective evaluation-based hybrid intelligent control optimization for shaft furnace roasting process. Control Eng Pract 20:857–868

¹¹ Jalali V, Leake D (2016) Ensemble of Adaptations for classification: learning adaptation rules for categorical features. ICCBR 9969:186–202

¹² Krowvidy, S., & Wee, W. G. (1993). Wastewater treatment systems from case-based reasoning. In Case-Based Learning. Boston: Springer.

¹³ Wiese, J., Stahl, A., & Hansen, J. (2005). Applying and optimizing case-based reasoning for wastewater treatment systems. AI Communications, S. 269-279.

¹⁴ Sarabia, Y. R., Bermúdez, X. C., Martínez, R. F., Rodríguez, Z. H., Moya, A. M., & Lorenzo, M. M. (2005). CBR-ANN hybrid model to optimize the sequence of wastewater treatments. ITEE, S. 711-720.

¹⁵ Schmitt, S., Stahl, A., & Hansen, J. (2002). A CBR Approach to Identification and Counteraction for Harmful Microorganisms in Wastewater Treatment Plants. Proceedings International Conference on Artificial Intelligence.

¹⁶ Quan, L. Y. (2018). Prediction of effluent Ammonia Nitrogen using FNN-based CBR. 37th Chinese Control Conference (CCC), S. 6137-6142.

¹⁷ Trstenjak, B., Palasek, B., & Trstenjak, J. (2019). A decision support system for the prediction of wastewater pumping station failures based on CBR continuous learning model. Engineering, Technology & Applied Science Research, S. 4745-4749.

¹⁸ Atanassov, A., & Boshnakov, K. (2014). Case-Based Reasoning Control of Biological Wastewater Treatment. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, S. 503-510.

Die Kombination von CBR mit Simulationsmodellberechnungen und Echtzeitdaten aus einem SCADA-System als prognostische Entscheidungshilfe für eine Gesamtbetrachtung Kanal-Kläranlage mit dem Ziel eines energieeffizienten Gesamtbetriebs mit gleichzeitiger Optimierung des Reinigungsbetriebs vor dem Hintergrund stark veränderlicher Betriebsbedingungen erfolgte zumindest für Deutschland erstmalig¹⁹. Darüber hinaus verwenden viele Experten und Wissenschaftler das Modell, um eine Fallbasis aufzubauen und dann CBR zur Lösung praktischer Probleme zu verwenden. Zum Beispiel erstellte Jiang²⁰ eine Fallbasis von MIKE21 und erstellte ein schnell überprüfbares Handbuch für die Vorbereitung auf Ölverschmutzungen am Huangpu-Fluss, um die plötzliche Verschmutzung des Huangpu-Flusses durch Ölverschmutzung zu lösen. Liao et al.²¹ entwickelten ein Modell zur Simulation schwerer innerstädtischer Unfälle und konstruierten jeweils Notfallvorsorgebasen für verschiedene Funktionsbereiche in Städten und verschiedene Arten von Unfällen. Sørensen et al.²² integrierten das dänische Notfallreaktionsmodell der Atmosphäre mit dem nuklearen Entscheidungsunterstützungssystem Accident Reporting and Guidance Operational System (ARGOS), hauptsächlich für die nukleare Notfallvorsorge.

Das Heringhausener CBR-System (siehe Kapitel 4) wurde in das lokale SCADA-System integriert, um anhand historischer und simulierter Betriebsdaten von Kläranlage z. B. eine Zulaufprognose bezüglich Zulaufmenge und Zulauffracht bei Trockenwetter zu generieren. Der Controller wurde so konzipiert, dass die konventionelle SBR-Steuerung nicht ersetzt wird; d.h. überlagerte, lokale Steuerungs- und Regelungskonzepte, die zur Sicherung eines ordnungsgemäßen Betriebs einer SBR-Anlage erforderlich sind, wurden nicht außer Kraft gesetzt. Dadurch wird z. B. auch sichergestellt, dass etwa eine Energieoptimierung nicht dazu führt, dass eine aerobe Schlammstabilisierung oder gar die erforderliche Reinigungsleistung nicht mehr gewährleistet ist. Letztendlich ist der CBR-Controller vielseitig einsetzbar und reagiert flexibel auf die verschiedensten Belastungssituationen. So können auch verschiedene Optimierungskriterien berücksichtigt werden. Die Kläranlage Heringhausen ist nach wie vor der erste geplante und realisierte Anwendungsfall des CBR-Verfahrens in einer Kläranlage in der deutschsprachigen Wasserwirtschaft. International wird das CBR-Verfahren bereits angewendet bzw. ist Gegenstand unterschiedlicher Planungen und Konzepte.

Nachfolgend werden einige exemplarische Fälle vorgestellt.

¹⁹ Müller-Czygan, G., Wiese, J., Tarasyuk, V., & Tschepetzki, R. (2022). Energieeinsparung auf Kläranlagen mit fallbasierter Steuerung (Cased Based Reasoning).

²⁰ Jiang W (2007) Study on the simulation of accidental oil spill in the Huangpu River. Dissertation, Tongji University

²¹ Liao GX, Weng T, Zhu QP (2005) A study on assistant decision support system for urban emergency response. Eng Sci 7:7–13 (in Chinese)

²² Sørensen JH, Baklanov A, Hoe S (2007) The danish emergency response model of the atmosphere (derma). J Environ Radioact 96:122–129

3.2.3.1. Granollers WWTP

Als Pilotprojekt des CBR-Verfahrens wurde die Kläranlage Granollers²³ in der Region Barcelona ausgewählt, um optimierte Sollwerte für die lokalen Regler des Prozesses zu erstellen. Die Kläranlage besteht aus zwei biologischen Reaktoren, die parallel arbeiten und sich das gleiche Luftverteilungssystem teilen. Die verfügbaren Daten, die von den installierten Sensoren für den untersuchten Fall erfasst werden, sind in Tabelle 4 aufgeführt, während Tabelle 5 die von dem vorgestellten System erzeugten Ausgaben zeigt, d.h. die Sollwerte für die lokalen Regelkreise. Alle diese Sensoren messen Online-Daten, die mit einer Minute Abtastzeit gespeichert wurden.

Tabelle 4: Verfügbare Sensoren Kläranlage Granollers

Type of sensor	# sensors	Units
Dissolved oxygen	10	mg/l
Plant Input flow	1	m ³ /h
Biological reactor input flow	1	m ³ /h
Internal recirculation frequency converter	2	Hz
External recirculation flow	2	m ³ /h
Ammonia concentration	2	mg/l
Nitrate concentration	2	mg/l
Suspended Solids concentration in the biological reactor	2	mg/l
Suspended Solids concentration in the output	1	mg/l
Phosphorus concentration in the output	1	mg/l
Aeration valves position	10	%
Air pressure	1	mbar

Tabelle 5: CBR-Parameter Kläranlage Granollers

Solution	# solutions	Units
Oxygen set-points	10	mg/l
Valves position set-points	10	%
Pressure set-point	1	mbar
Biological reactor state (nitrification or denitrification)	2	-

Die aus den historischen Daten nach den Vorverarbeitungsschritten gewonnene Fallbasis wurde zunächst in einem flachen Speicher in einer einzigen Fallbasis organisiert. Später, in einer verbesserten Version, sollen mehrere Falldatenbanken in Abhängigkeit vom Zustand des biologischen Reaktors organisiert werden, um die Ausführungszeit zu verringern und den Abrufprozess genauer zu gestalten. Der Zustand des biologischen Reaktors - Nitrifikation oder Denitrifikation - hängt nicht immer von der Situation der Anlage ab.

²³ Pascual-Pañach, J., Cugueró-Escofet, M. À., Sánchez-Marrè, M., & Aguiló-Martos, P. (2019). Application of CBR for Intelligent Process Control of a WWTP. In *Artificial Intelligence Research and Development* (pp. 160-169). IOS Press.

Das Hauptmerkmal, das berücksichtigt werden muss, um zu bestimmen, in welcher Phase der Prozess betrieben werden muss, ist die Ammoniumkonzentration. Für die in diesem Beispiel beschriebene Anlage - mit zwei biologischen Reaktoren - und unter Berücksichtigung von zwei Zuständen des biologischen Prozesses - d.h. Nitrifikation und Denitrifikation – wurde die Verwendung von vier Fällen vorgenommen. Im Abrufschritt wurde ein Fall aus dem Fallspeicher entsprechend dem verwendeten Ähnlichkeitsmaß abgerufen. Da alle Variablen des Datensatzes numerisch sind, wurde der euklidische Abstand als erster Ansatz verwendet, aber auch andere Ansätze wurden in Betracht gezogen. In der Anpassungsphase wurde die gleiche Lösung des ähnlichsten Falles angewandt, d. h. eine sog. Nullpunktanpassung. Der Bereich aller Sollwerte wurde von den beteiligten Experten für den Prozess festgelegt und kann zukünftig vom Betriebsleiter geändert werden. Wenn die definierte Lösung nicht innerhalb des Definitionsbereichs liegt, können die Sollwerte angepasst werden, um die konfigurierten Grenzen zu erfüllen. Um die Genauigkeit der Sollwertberechnung zu erhöhen, wird in den nächsten Schritten der Einsatz regelbasierter Anpassungsmethoden untersucht, die das Wissen des Betriebsleiters berücksichtigen. Abbildung 12 zeigt die Phasen des CBR.

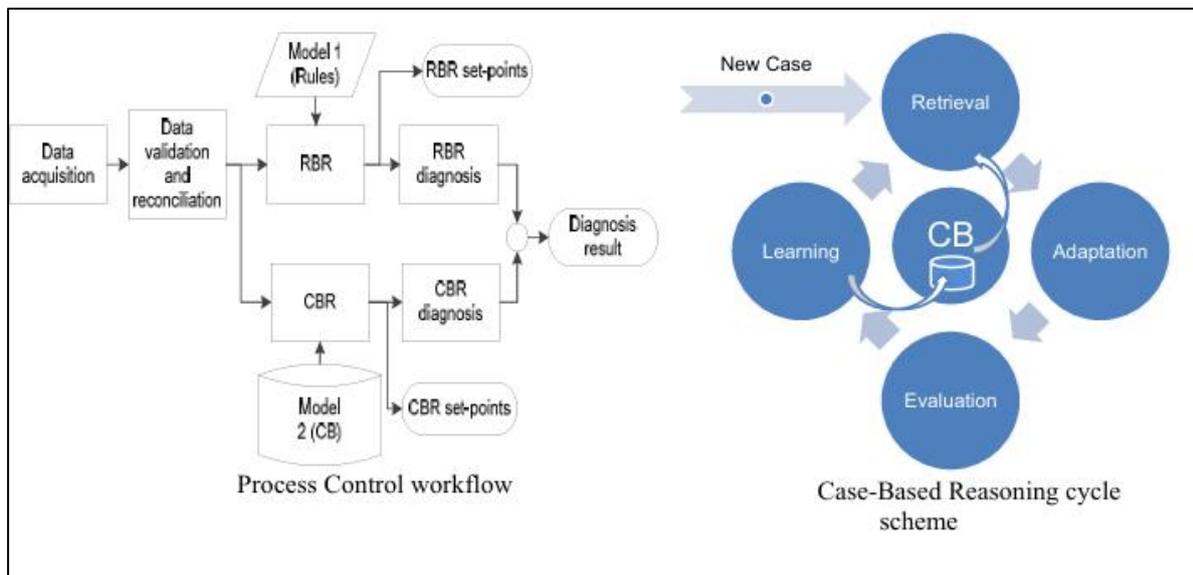


Abbildung 12: CBR-Prinzip Kläranlage Granollers⁵

Im Vergleich zum begutachteten Vorhaben „Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0“ wurden im Projekt Kläranlage Granollers nur vier verschiedene Fälle untersucht, im Vorhaben „Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0“ waren es insgesamt 20 Fälle. Ansonsten wurde mit den Ergebnissen der CBR-Berechnung ähnlich vorgegangen wie in Heringhausen, der Betriebsführer entscheidet, welche der vorgeschlagenen Sollwerte zu verwenden sind.

3.2.3.2. Fehlererkennung in Pumpstationen

Auf der Basis üblicher Prozesse im Betrieb von Pumpstationen wurde zur Fehlererkennung ein CBR-Verfahren konzipiert²⁴. Dabei wurden kontinuierlich im SCADA erfasste Daten der verschiedenen Prozesse analysiert, „gereinigt“, plausibilisiert und für den CBR-Prozess verfügbar gemacht. Als Vergleichszeitraum der verschiedenen Prozesse wurde die Betriebswoche gewählt, d.h. alle erfassten Daten wurden auf eine Betriebswoche bezogen. Ziel war es, so die zu erwartenden Prozessabläufe einer nächsten Betriebswoche vorherzusagen.

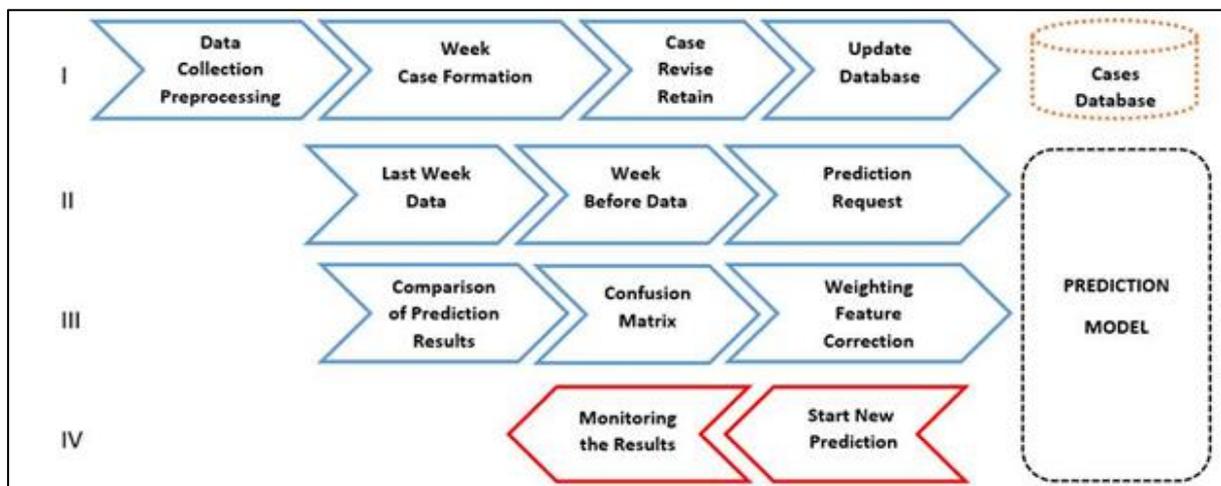


Abbildung 13: CBR-Prinzip zur Fehlererkennung in Pumpstationen⁶

3.2.3.3. Hydrodynamisches Wasserqualitätsmodell und GIS

Das Hauptziel des Projektes²⁵ war es, mit der CBR-Methode ein Entscheidungsunterstützungssystem zu schaffen (siehe Abbildung 14), das auf der Integration eines hydrodynamischen und Wasserqualitätsmodells sowie eines GIS basiert. Die detaillierten Ziele waren:

1. Etablierung eines hydrodynamischen und Wasserqualitätsmodells in einer mittelgroßen Stadt namens Chaohu im Südosten Chinas mit spezifischen Funktionsanforderungen, Falldesign- und Fallargumentationsschritten;
2. vorgenerierte Fälle des im GIS gespeicherten Modells erstellen, das die Fallbasis bildet; und
3. den Fall direkt aus der Fallbasis mit der CBR-Methode als Ausgabe des aktuellen Modellergebnisses aufrufen.

²⁴ Trstenjak, B., Palasek, B., & Trstenjak, J. (2019). A Decision Support System for the Prediction of Wastewater Pumping Station Failures Based on CBR Continuous Learning Model. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(5).

²⁵ Liao, Z., Zhou, C., Tian, W., Hu, T., & Guo, R. (2019). CBR-based integration of a hydrodynamic and water quality model and GIS—a case study of Chaohu City. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 6436-6449.

In dieser Studie wurde eine mittelgroße Stadt namens Chaohu als Beispiel genommen, um ein CBR-basiertes Entscheidungsunterstützungssystem zu entwickeln, das ein hydrodynamisches und Wasserqualitätsmodell und GIS integriert. Die Stadt Chaohu liegt in der Provinz Anhui, China, in der Nähe des Jangtse-Flusses, umgeben von reichhaltigen Ressourcen für sauberes Wasser. Im Untersuchungsgebiet gibt es vor allem zwei Probleme. Erstens ist die Selbstreinigungsfähigkeit des Gewässers aufgrund der fehlenden internen Zirkulation und der fehlenden externen Injektion von sauberem Wasser relativ schwach. Zweitens wurden viele Abwasserkanäle entlang des Flusskanals nicht abgefangen, was eine große Bedrohung für die Sicherheit der Wasserumwelt darstellt. Daher werden zwei Arten von Verbesserungsmaßnahmen ergriffen, darunter die Wasserumleitung und die Abfangung von Abwasser.

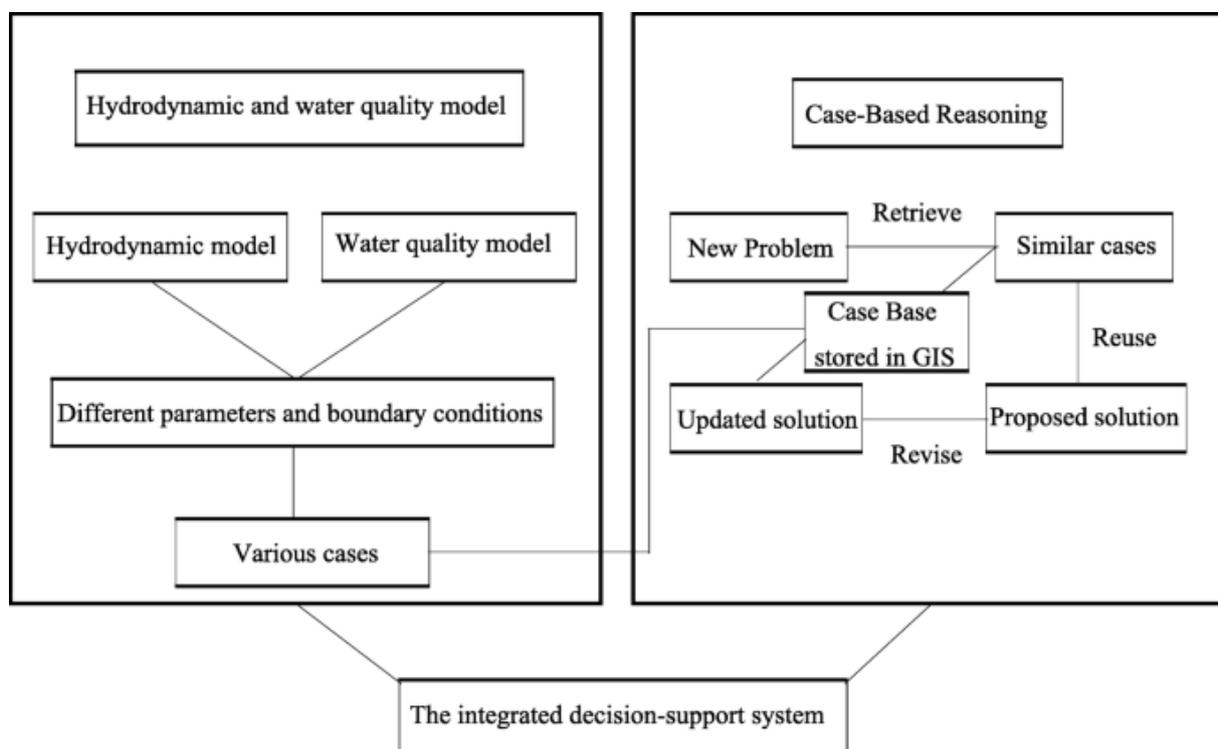


Abbildung 14: Rahmen des Entscheidungsunterstützungssystems¹⁶

3.2.3.4. *Identifikation anormaler Situationen bei der Nährstoffentfernung in SBR-Anlagen*

Bei der Überwachung normaler und abnormaler Betriebsbedingungen in einem SBR-Prozess wird ein Komprimierungswerkzeug verwendet, mit dem der Prozess mit wenigen Variablen beschrieben werden kann, und um Chargen mit anormalen Bedingungen zu erkennen²⁶. Allerdings wurden einige anormale Bedingungen (Alarmer) ausgelassen oder es kommt zu Fehlalarmen. Um diese Lücke zu schließen, wurde die Anwendung von CBR untersucht. Es wurde angenommen, dass ähnliche Probleme ähnliche Lösungen haben sollten. In biologischen Prozessen handelt es sich bei diesen Problemen im Allgemeinen um Betriebssituationen unter normalen oder anormalen Bedingungen: niedriger O₂-Wert, hoher pH-Wert, Sensorfehler und andere. Diese Symptome sollen in einer Case Base gespeichert werden, um zukünftige Situationen zu diagnostizieren.

²⁶ Garcia, M., Ruiz, M., Colomer, J., & Meléndez, J. (2007, July). Multiway Principal Component Analysis and Case Base Reasoning methodology for abnormal situation detection in a nutrient removing SBR. In 2007 European Control Conference (ECC) (pp. 5354-5360). IEEE.

4. Aufbau CBR-System

4.1. Simulationswerkzeug SIMBA

Für die Planung und Optimierung von Kläranlagen und Kanalnetzen hat sich das Werkzeug Dynamische Simulation zur Erprobung verfahrenstechnischer und automatisierungstechnischer Optionen etabliert. Für diese Aufgabe stehen international eine Anzahl von Simulationsumgebungen zur Verfügung. Für die Planung von Kanalnetzen ist die Nutzung von Simulationswerkzeugen bereits Stand der Technik. Für die Planung von Kläranlagen hat sich die Nutzung der Simulation in Deutschland noch bei weitem nicht so stark etabliert. Hier bilden das Arbeitsblatt DWA-A 131 bzw. das Merkblatt M 210 (für SBR) und seine Vorgängerversionen seit vielen Jahrzehnten die maßgebenden Bemessungsvorschriften für den Bau bzw. die Erweiterung von Abwasserbehandlungsanlagen. Dabei werden auf Basis der ermittelten Zulaufkenngrößen und der erforderlichen Elimination der Verschmutzungsparameter mittels einer statischen Berechnung das notwendige Anlagenvolumen sowie der Luftertrag, die Rezirkulations- und Rücklaufschlammvolumenströme ermittelt. Parallel dazu ist in den letzten Jahrzehnten die dynamische Simulation der Belebtschlammprozesse von Kläranlagen ein hilfreiches Werkzeug für verschiedenste Fragestellungen geworden. So wurden und werden viele Simulationsstudien zur Bewertung und Optimierung des Anlagenbetriebes, des Regelungssystems sowie der Bewirtschaftung von einzelnen Stoffströmen realisiert. International werden Belebtschlammmodelle vielfältiger eingesetzt. Zur Nutzung des Werkzeuges Dynamische Simulation zur Quantifizierung von Kapazitätsreserven sind folgende Randbedingungen zu erfüllen.

- Konsistenz zu Bemessungsvorschriften und Genehmigungsgrundlagen: Parametrierung eines Belebtschlammmodells bemessungskonsistenter Simulationsergebnisse zur Gewinnung realitätsnaher Outputergebnisse
- Anwendbarkeit bei typischer Datenbasis: Generierung eines anlagenspezifischen dynamischen Zulaufs mit einem Zulaufmodell

Generell muss sich der Aufwand zur Durchführung von Simulationsstudien auf einem Niveau befinden, dass diese Methode auch für mittlere und kleine Anlagen einsetzbar ist. Entsprechende Aktivitäten zur Reduktion dieses Aufwandes wurden von der Hochschulgruppe Simulation initiiert^{27,28,29} und im Vorhaben Diemelsee berücksichtigt. Das Werkzeug Dynamische Simulation ist nicht als konkurrierende Vorgehensweise zur Nutzung statischer Dimensionierungsvorschriften wie der DWA-A 131 bzw. das DWA-M 210 zu sehen. Die Auslegung der Anlagengröße in Heringhausen erfolgte ausschließlich auf Basis der Dimensionierungsvorschriften DWA-A 131 bzw. DWA-M 210.

²⁷ Ahnert, M.; Oppermann, J.; Hurlzmeier, S.; Barth, M.; Gerard, I.; Abel, T.; Bernatzky, C.; Marx, C.; Kühn, V. (2014a). Das Forschungsprojekt „Zeiteffiziente Analyse von Kläranlagen“ (ZAK) – Von der Idee zum Produkt. Korrespondenz Abwasser, KA 2/2014,

²⁸ Ahnert, M.; Alex, J.; Dürrenmatt, D.J.; Langergraber, G.; Hobus, I.; Schmuck, S.; Spering, V.: Dynamische Simulation als Bestandteil einer Kläranlagenbemessung nach DWA-A 131. KA - Korrespondenz Abwasser Abfall 62(7):615-624, 2015:124-130.

²⁹ Alex, J.; Dürrenmatt, D.J.; Langergraber, G.; Hobus, I.; Spering, V.: Voraussetzungen für eine dynamische Simulation als Bestandteil einer Kläranlagenbemessung nach DWA-A 131. KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall 62(5):436-446, 2015

Für die Entwicklung des CBR-Modells war aufgrund fehlender Fallbeschreibungen die Erstellung entsprechender Szenariensimulationen erforderlich. Vielmehr sind die in Simulationen verwendeten Modellannahmen auch in die Entwicklung der Dimensionierungsvorschriften eingegangen und andererseits haben die Erfahrungen aus der Dimensionierung zu Parameter-Vorgaben in der Anwendung von Belebtschlammmodellen unter typischen kommunalen Bedingungen geführt. Beide Werkzeuge ergänzen sich also, im Zweifelsfall berücksichtigt die dynamische Simulation mehr Details auf Kosten eines unter Umständen größeren Aufwandes bei der Datenerhebung und Anwendung. Ein grundlegender Unterschied bei der Anwendung ist in Abbildung 15 dargestellt.

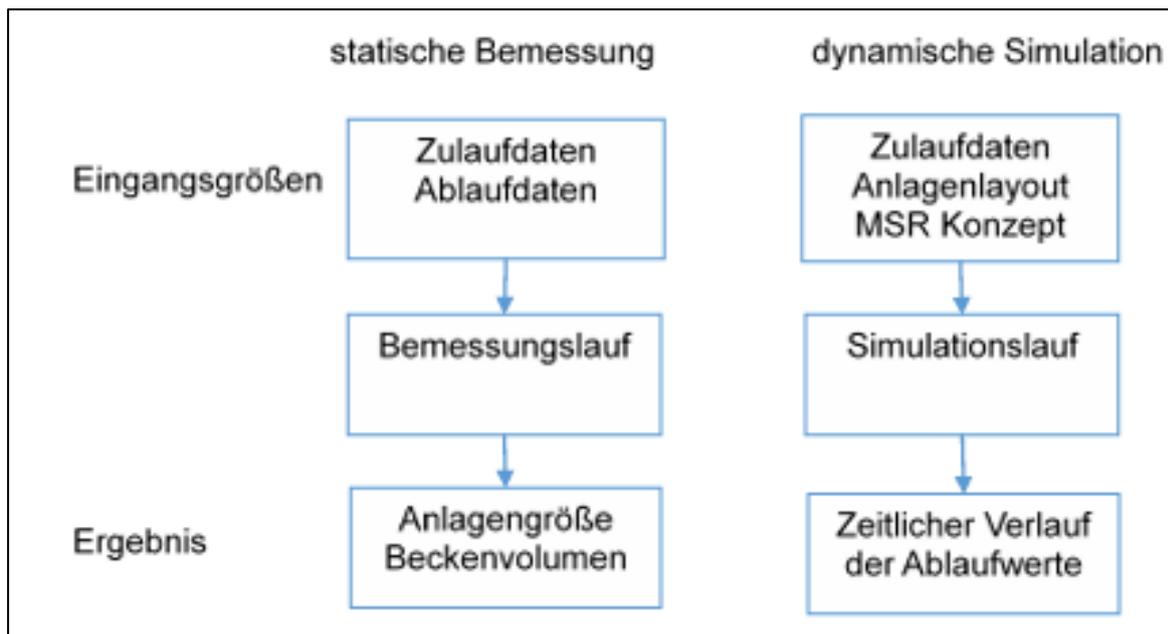


Abbildung 15: Anwendung von Bemessung und Simulation³⁰

Bei einer Bemessung entspricht das Berechnungsergebnis der Aufgabenstellung, es wird berechnet, wie groß eine Kläranlage sein muss, um bestimmte Ablaufwerte einzuhalten. Bei der Anwendung der Simulation muss man indirekter arbeiten, die Simulation liefert die zu erwartenden Ablaufwerte bei einer vorgegebenen Anlagengröße, man muss als Nutzer also selbst die Beckenvolumen iterieren, um eine ausreichende Anlagengröße zu bestimmen. Dieser Ablauf ist Abbildung 16 auf der linken Seite dargestellt.

³⁰ Alex, J., & Ogurek, M. (2020). Simulation als Tool zur Quantifizierung von Kapazitätsreserven. In # PLACEHOLDER_PARENT_METADATA_VALUE# (Vol. 252, pp. 147-166). TU, Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement.

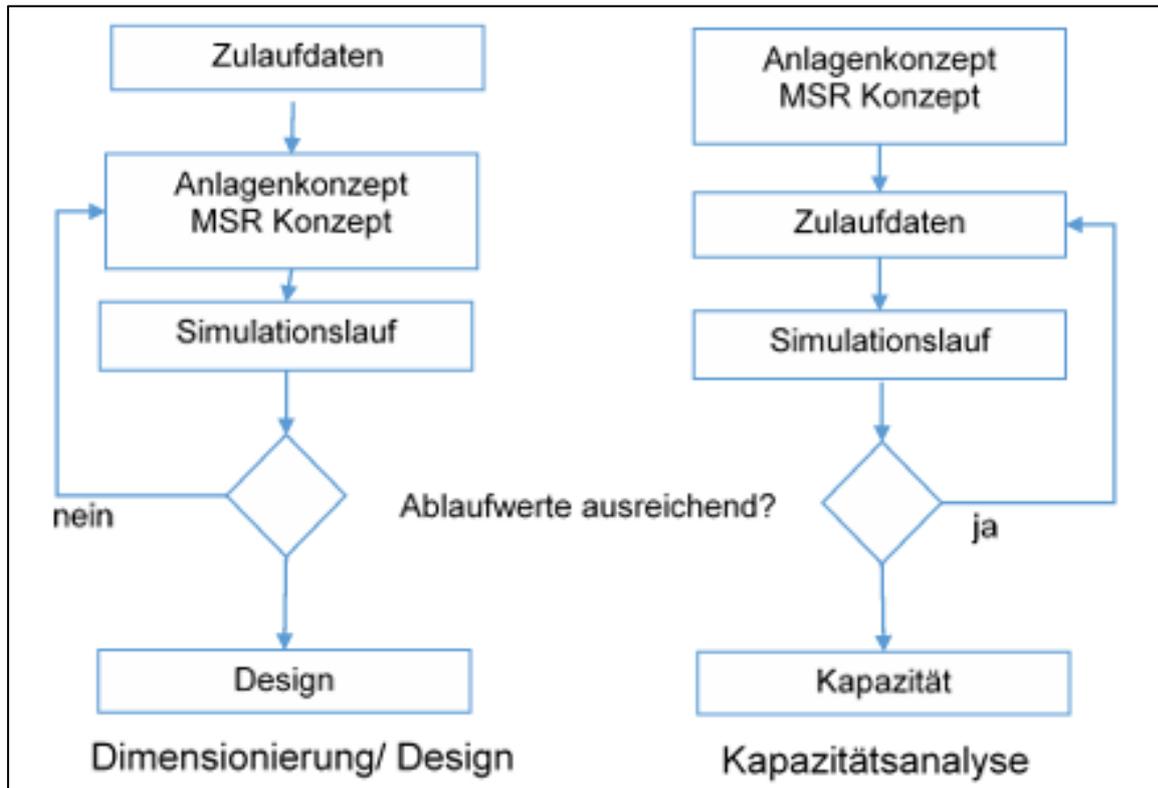


Abbildung 16: Dimensionierung und Kapazitätsanalyse mit Simulation³⁰

Um sicherzustellen, dass die Dimensionierung gemäß DWA-A 131 bzw. DWA-M 210 und Simulation konsistente (und zur Realität passende) Aussagen liefern, wurden durch die Hochschulgruppe Simulation²⁸ folgende Maßnahmen und Methoden entwickelt:

- Parametrierung eines Belebtschlammmodells (ASM3 [ASM3 1999], ASM3biop) zur Gewinnung bemessungskonsistenter Simulationsergebnisse
- Generierung eines anlagenspezifischen dynamischen Zulaufs mit einem Zulaufmodell
- Definition und Berechnung von Lastfällen bzw. Szenarien.

Die Parameteranpassungen stellen sicher, dass mit der Simulation bei gleicher Zulauffraktionierung eine vergleichbare Schlammproduktion gerechnet wird, die Nitrifikation ähnliche Schlammalter erfordert und die Denitrifikationskapazitäten vergleichbar zur Bemessung berechnet werden.

4.2. Realisiertes Verfahrenskonzept

4.2.1. Entscheidungsgrundlage für CBR

Im Zuge der Überlegungen für eine intelligente Steuerungslösung für die neue Kläranlage Heringhausen wurde mit dem Ziel der maximalen Algorithmentransparenz sowie der Einbeziehung des Betreibers das CBR-Verfahren ausgewählt³¹. Die Gemeinde Diemelsee hatte als Betreiber der Kläranlage Heringhausen weder ausreichend historische Daten von Kanalnetz und Kläranlage noch die finanziellen Mittel, um im Vorfeld der Neubau- und Sanierungsarbeiten eine ausreichende Sensorenanzahl zu installieren, um die notwendige Datendichte zum Anlernen von KI-Modellen zu erzeugen. In Heringhausen liegt der spezielle Fall vor, dass die Abwasserzuflussbedingungen aufgrund des Tourismus extrem schwanken. Dabei ändern sich nicht nur die Abwassermengen je nach Saison. Gerade die extreme Zunahme des Campingmobil-Tourismus stellt für attraktive Orte wie Heringhausen (mit dem Badesee Diemelsee) eine besondere Herausforderung dar³². Campingmobile führen eigene Toiletten/Abwassersysteme mit sich, die meist auf Stellplätzen wie am Diemelsee entleert werden. Neben einer hohen Konzentration an Abwasserschmutzstoffen enthalten die Sammelsysteme aus hygienischen Gründen zudem noch chlorhaltige Chemikalien, die für die biologischen Behandlungsprozesse eine starke Belastung bedeuten, wenn diese extremen Schmutzstöße der Kläranlage nicht vorausschauend zugeführt werden. In Heringhausen ist wie bei vielen Kläranlagen in Tourismusgebieten mit weitaus mehr unterschiedlichen Lastfällen zu rechnen als bei normalen Kläranlagen. Unabhängig des erforderlichen CBR-Algorithmus galt es, die in Frage kommenden Lastfälle zu ermitteln und mit Hilfe eines Simulationsmodelles die erforderliche Datendichte für einen passenden CBR-Algorithmus zu erzeugen. Realdaten in ausreichender Menge standen nicht zur Verfügung.

4.2.2. CBR-Modell

4.2.2.1. Modellaufbau

Im Zuge der Überlegungen für eine intelligente Steuerungslösung für die neue KA Heringhausen wurde zuerst ein detailliertes, computergestütztes Modell erstellt, welches dazu verwendet wurde, verschiedene Lastfälle des späteren SBR-Betriebs zu simulieren (z. B. Saison, Nicht-Saison, Tagesgänge, Trockenperioden, Mischwasserzufluss).

³¹ Müller-Czygan, G.; Wiese, J.; Vogel, J.: Fallbasierte Steuerungen – ein Zukunftsmodell für mehr Betriebseffizienz und Anlagensicherheit in der Abwassertechnik!? KA Korrespondenz Abwasser, Abfall – 2021 (68) Nr. 2, 102-106

³² Der Anstieg von Caravans und Reisemobilen zwischen 2017 und 2021 betrug mehr als 60 % (von 68.957 Einheiten in 2017 auf 111.609 Einheiten in 2021). In 2023 waren es immer noch > 90.000 Einheiten. Quelle: Statista

Aus den Ergebnissen wurden geeignete Betriebskonzepte abgeleitet, die dann vom Betriebspersonal in Form von Sollwert-/Einstellparameter in die Kläranlagensteuerung eingetragen werden, um adäquat auf die jeweilige Belastung reagieren zu können. Das Modell bot die Möglichkeit, Eingangsdaten für die geplante CBR-basierte Entscheidungsunterstützung zu generieren. Zum Einsatz kam das Simulationswerkzeug SIMBA#, das in Deutschland in der Abwasserwirtschaft weit verbreitet ist³³. SIMBA# enthält eine hohe Anzahl verschiedener Reinigungsmodelle und virtueller technischer Komponenten, sodass die verfahrenstechnische Seite einer Kläranlage vollständig beschrieben werden kann. Mit dieser Software können neben den biologischen Prozessen auch Energie- und Stoffströme simuliert werden, so dass auch das Ziel einer maximalen Energieeffizienz betrachtet werden kann³⁴. Die ungewollten Schmutzfrachtausträge aus Kanalnetz (inkl. Regenüberläufen) und Kläranlage können in SIMBA# gemeinsam simuliert werden. es, die Auswirkung unterschiedlicher Wetter- und Zuflussereignisse auf den Zulauf zur Kläranlage mit eingegebenen Niederschlagsprognosen abzuschätzen.

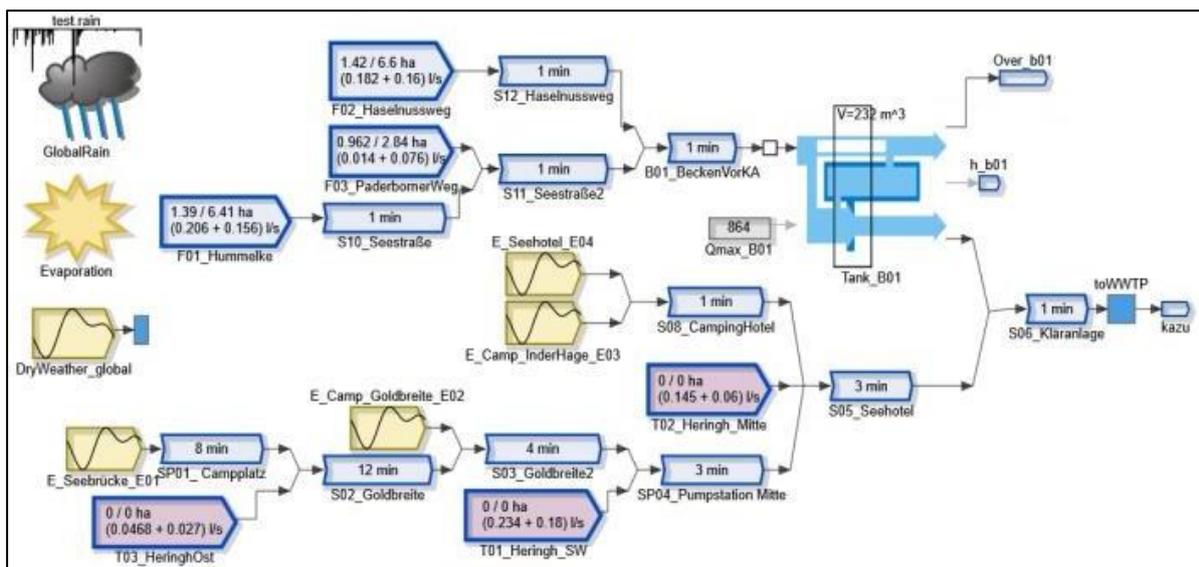


Abbildung 17: SIMBA#-Kanalnetzmodell KA Heringhausen³⁵

³³ Alex, J., & Ogurek, M. (2020). Simulation als Tool zur Quantifizierung von Kapazitätsreserven. In Wiener Mitteilungen (S. 147-166). Wien: TU Wien.

³⁴ Eine Energiebetrachtung mit SIMBA# wurde im Zuge des UIP-Projektes nicht vorgenommen, da zum Zeitpunkt der Simulationsdurchführungen das SIMBA-Tool zur Energiebetrachtung noch in der Erprobung war.

³⁵ Müller-Czygan, G.; Wiese, J.; Tarasyuk, V. & Tschepetzki, R. (2022). „Energieeinsparung auf Kläranlagen mit fallbasierter Steuerung (Cased Based Reasoning)“. In: Daniel Demmler, Daniel Krupka, Hannes Federrath (Hrsg.). „INFORMATIK 2022 – Informatik in den Naturwissenschaften“

Abbildung 17 zeigt beispielhaft das mit SIMBA# erstellte Kanalnetzmodell der Einzugsgebiete der Kläranlage Heringhausen für einen beispielhaften Belastungsfall aus dem Simulationsprogramm SIMBA#. Die einzelnen Symbole stellen die für den Lastfall relevanten Abflussmengen dar, die als Regen- und Abwassergemisch (blau), als reines Abwasser (gelb) und als sogenanntes Fremdwasser (violett, z.B. Grundwasser, welches in undichte Kanäle eintritt) der Kläranlage zufließen. Die dahinerliegenden Berechnungsschritte erlauben Prognosen sind abhängig von Intensität und Dauer des Niederschlags, von der Verteilung auf die Einzugsgebiete und den Fließzeiten im Kanalnetz und den Kapazitäten vorgeschalteter Stauräume. Mit dem Computermodell SIMBA# ist dies alles erfassbar, so lassen sich viele verschiedene Belastungssituationen für eine Kläranlage testen (Eingabe unterschiedlicher relevanter Abflussmengen je nach Wetterdateneingabe und erwarteter Touristenanzahl) und als Basis für ein CBR-System erzeugen. Ausgehend von den Zuflussszenarien des Kanalnetzmodells (Abbildung 17) erfolgte im nächsten Schritt die Untersuchung, wie sich die verschiedenen Zuflussszenarien auf die Performance der Kläranlage auswirken können. Für die Aufgabenstellung der Kläranlage Heringhausen wurde mit dem Ziel eines adäquaten Verhältnisses von Aufwand und Nutzen ein entsprechendes Modell der Kläranlage durch grafische Verschaltung von Funktionsblöcken entsprechend. Das aus dem Kanal kommende Abwasser fließt nach erfolgter Abtrennung von Grobschmutzstoffen zuerst in einen Vorlagebehälter, der dazu dient, die Zulaufspitzen zu dämpfen und für eine gezielte Abwasserzugabe in die Reaktoren (SBR 1 und 2) zum Abbau organischer Schmutzstoffe zu sorgen (biologische Behandlung). Das Modell enthält wie die echte Anlage alle realisierten Pumpen, Rührwerke und Messsensoren der jeweiligen Prozessstufen (als Funktionsblöcke ausgewiesen) sowie die in Realität programmierten Steuerungsprozessschritte und bildet somit den Abwasserprozess nahezu in realgetreuer Weise ab.

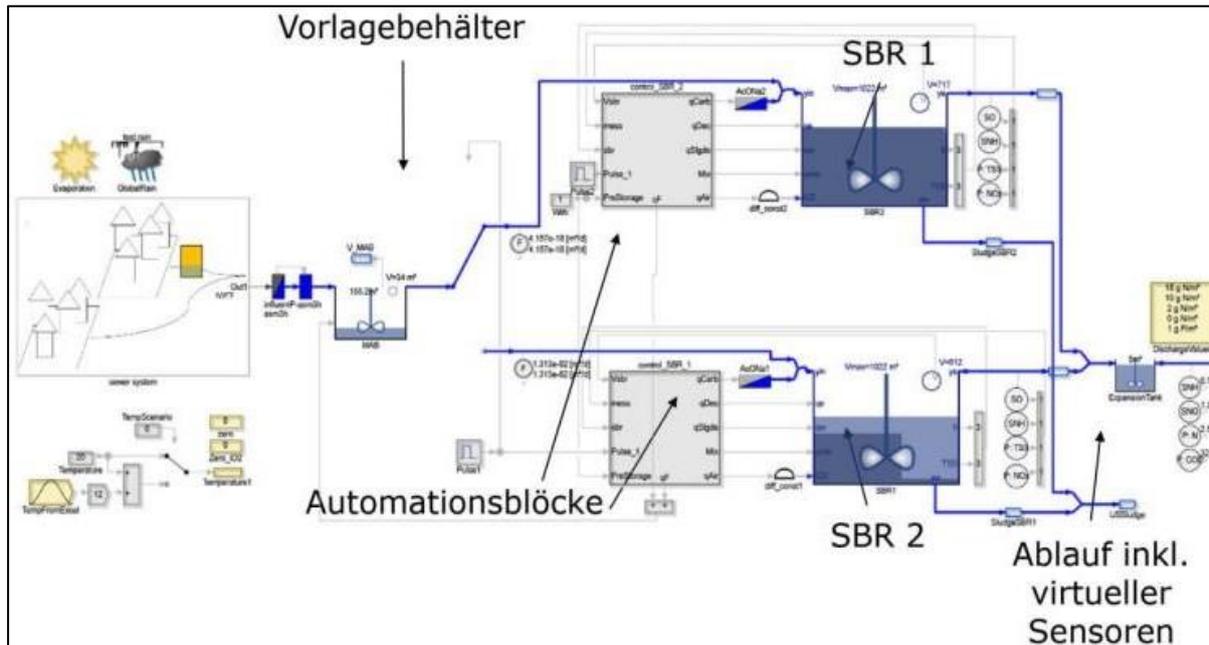


Abbildung 18: SIMBA#- Kläranlagenmodell KA Heringhausen³⁵

Abbildung 19 zeigt exemplarisch den Baustein für die Steuerung der beiden biologischen SBR-Reaktoren. Die in der biologischen Stufe stattfindenden mikrobiologischen Prozesse werden mathematisch beschrieben, deren Inputdaten dargestellt und die zu erwartenden Outputdaten ermittelt. Maßgebend für die Bewertung der gesamten Simulationsberechnungen sind die Outputdaten, die mit den in der Realität einzuhaltenden Schmutzstoffparameter übereinstimmen, die eine Genehmigungsbehörde dem Kläranlagenbetreiber als Einleitgrenzwerte in ein Gewässer vorschreibt. Wichtige verfahrenstechnische Prozesse wie die Zugabe von Prozessluft, die Abwassermengenzugabe oder die Durchmischung des Abwassers mittels Rührwerke werden mathematisch ebenso berücksichtigt wie das Wachstum der Abwasserbakterien sowie die Entnahme der überschüssigen Bakterienmasse. Von besonderer Bedeutung sind die aus dem Simulationsmodell zu generierenden Steuerungsparameter. Sobald ein Lastfall die gewünschten Outputdaten erzeugt (z.B. Konzentration organischer Substanzen, Stickstoff- und Phosphatgehalt oder pH-Wert im gereinigten Abwasser), wird ermittelt, mit welchen Steuerungsparametern dies erreicht wurde (z.B. Lufteintragsmenge, Vermischungsenergie, Abwassermengenzugabe). Sie sind die entscheidenden Daten, die der Abwasserbetrieb in Heringhausen benötigt, um die reale Anlage so einzustellen, dass auch der reale Prozess gemäß den behördlichen Auflagen betrieben wird.

Die biologischen Prozesse wurden nachgebildet auf Basis des sog. Activated Sludge Modell No. 3³⁶, einem seit vielen Jahren weltweit bewährten mathematischen Modell zur Nachbildung des Kohlen- und komplexen Stickstoffstoffabbaus biologischer Abwasserprozesse, welches in Abbildung 20 als Anschauung dargestellt ist. Zur weiteren Erklärung wird auf die einschlägige Literatur verwiesen.

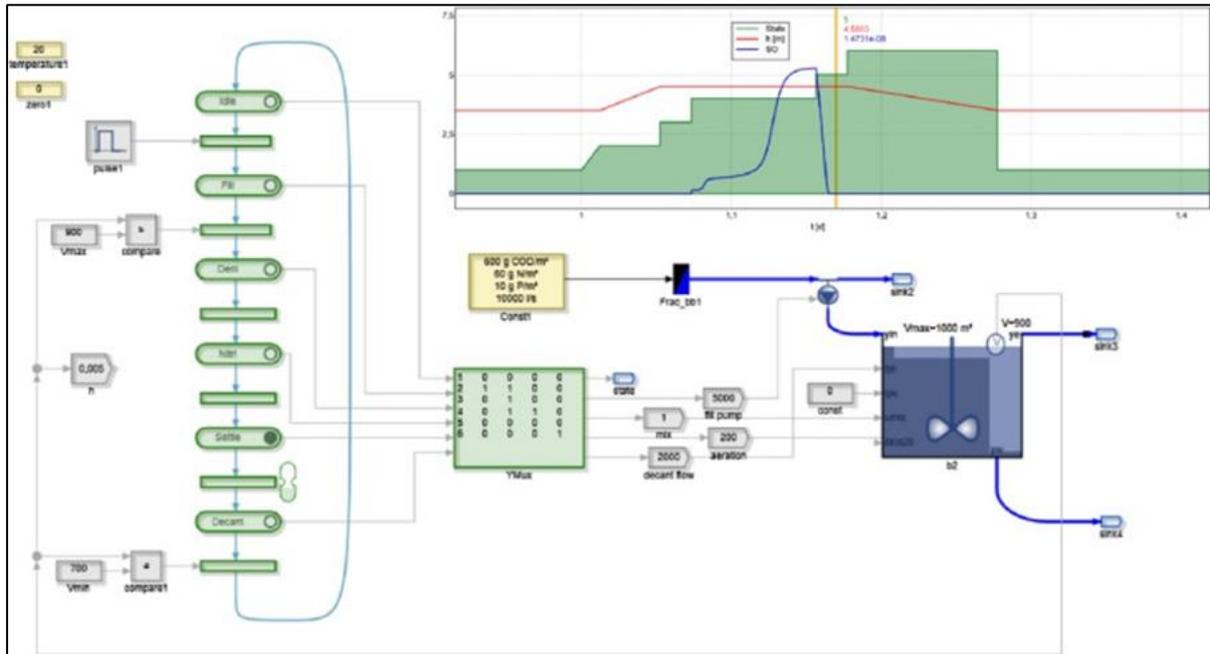


Abbildung 19: SIMBA#-Modell der Zyklensteuerung KA Heringhausen³⁵

³⁶ Koch, G., Kühni, M., Gujer, W., & Siegrist, H. (2000). Calibration and validation of Activated Sludge Model No. 3 for Swiss municipal wastewater. *Water Research*, S. 3580–3590.

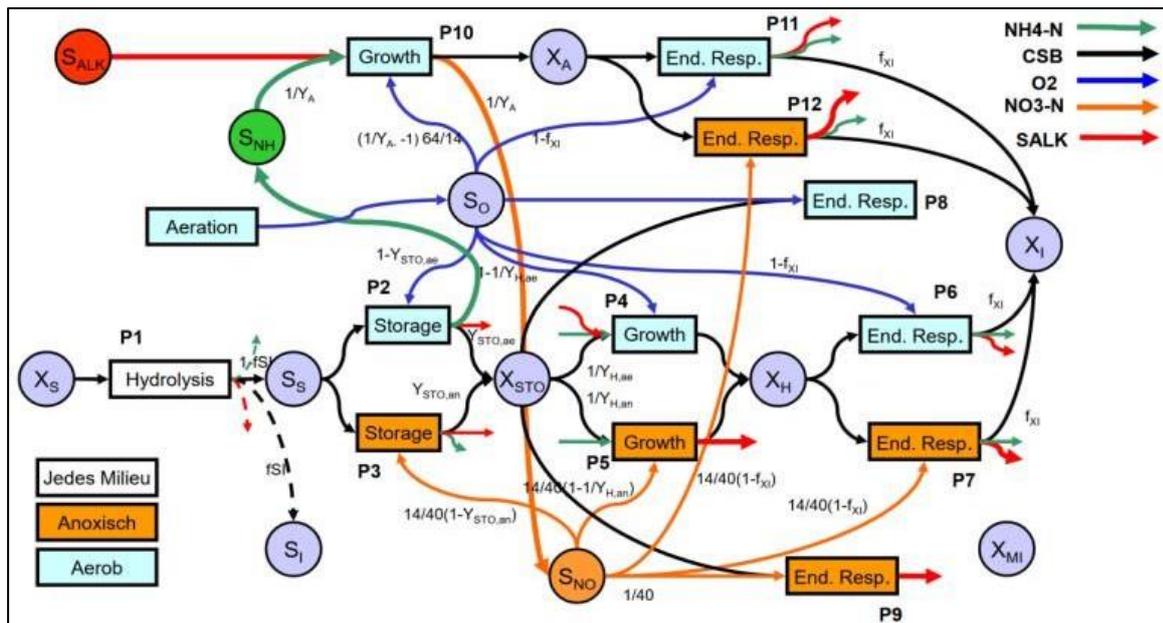


Abbildung 20: Prinzip des verwendeten biologischen Modells zum Schmutzstoffabbau³⁷

4.2.2.2. Einbezug des Betriebspersonals

Unter Einbezug der Erfahrung und des Wissens des lokal tätigen Betriebspersonals wurden zahlreiche verschiedene Belastungssituationen (Trocken-/Regenwetter, unterschiedliche Abwassertemperaturen, Normalbelastung/Ausbaubelastung/Extrembelastung, etc.) definiert, die mit Hilfe des zuvor beschriebenen SIMBA#- Kläranlagenmodells berechnet und überprüft wurden. Hierbei spielte das Erfahrungswissen des Betriebspersonals die entscheidende Rolle, da keine ausreichende Anzahl dokumentierter Daten vorlag, was typisch ist für Kläranlagen im ländlichen Raum. Über das gesamte Betriebs- und Prozesswissen verfügte fast ausschließlich das Betriebspersonal und das beauftragte Ingenieurbüro, welches die Anlage geplant und betreut hatte. Je stärker und detaillierter das Betriebspersonal das Erfahrungswissen in die Modellerstellung als Basis der CBR-Berechnung einbringen durfte, desto engagierter wurde es insgesamt bei der Implementierung dieser innovativen digitalen Lösung. Die intensive Zusammenarbeit zwischen Modellentwickler und Betriebspersonal hat gezeigt, dass in Heringhausen die erwartete hohe Anzahl unterschiedlicher Zulaufbedingungen (Lastfälle) zu berücksichtigen war. Insgesamt wurden 20 verschiedene relevante Lastfälle identifiziert, mit deren Auftreten zu rechnen ist.

³⁷ IFAK. (2022). SIMBA#. Von <https://www.ifak.eu/de/produkte/simba> abgerufen

Für alle Lastfälle wurden federführend mit der Projektgesellschaft Diemelsee Abwasser GmbH unter Einbezug des Betriebspersonals die Inputdaten ermittelt und in das beschriebene Simulationsmodell integriert. Als wesentliches Ziel der Lastfallsimulationen galt es, für jeden einzelnen Lastfall die erforderlichen Steuerungsparameter zu ermitteln, damit das Betriebspersonal bei Auftreten eines Lastfalls die Kläranlage optimal einstellen kann. Das Ergebnis der Simulationen dient als Entscheidungshilfe für das Betriebspersonal. Eine automatische Aktivierung der Steuerung in Abhängigkeit der Simulationsergebnisse war weder zum UIP-Antragszeitpunkt vorgesehen, noch ergab sich Zuge der Betriebserprobung eine entsprechende Notwendigkeit hierzu.

4.2.2.3. Abgleich der simulierten Lastfalldaten mit der Realsituation

Die alleinige Beschreibung und Berechnung von Outputdaten und Steuerungsparametern möglicher Lastfälle mit einem Simulationsprogramm wie SIMBA# hat für das Betriebspersonal von Abwasserinfrastruktureinrichtungen erst einmal keinen großen Handlungswert. Zwar liegen nun Informationen vor, wie eine Kläranlage für jeden Lastfall energieeffizient und rechtssicher zu betreiben ist. Da sich die Auswirkungen von Steuerungsanpassungen in biologischen Abwassersystemen erst nach vielen Stunden bis Tagen zeigen, ist ein rechtzeitiges Handeln und ein vorausschauender Systembetrieb wünschenswert. Die optimale Nutzung von Simulationsinformationen ist dann gegeben, wenn ein stetiger Abgleich der Lastfalldaten mit der Realsituation erfolgt, zum Beispiel dadurch, dass ein weiteres System diese Daten auswertet und dem Betriebspersonal aufzeigt, mit welchen Lastfällen in den folgenden Tagen zu rechnen ist, um komplexe Abwassersysteme rechtzeitig auf neue Lastfälle anzupassen. Bisherige Versuche mit neuronalen Netzen oder Fuzzy-Logiken wurden in der Abwassertechnik zwar erprobt und für Einzelprozesse wie z.B. die Luftregelung der den Mischwasserzufluss auch realisiert^{38,39}. Deren Anwendung ist bei komplexen Gesamtsystemen aber nicht gewünscht, da diese Lösungen keine ausreichende Transparenz der Ergebnisermittlung bieten⁴⁴. Aus diesem Grund wurde für das Vorhaben Heringhausen der Einsatz des CBR-Verfahrens ausgewählt. Wie bereits erläutert, handelt es sich bei dem CBR-Verfahren, um einen Ansatz, der es ermöglicht, ein neues, unbekanntes Problem zu lösen, indem man die Lösung eines bereits bekannten Problems verwendet oder anpasst.

³⁸ Seggelke, K., Tränckner, J., Fuchs, L., & Krebs, P. (2009). Fuzzybasierte Regelung des Mischwasserzuflusses. *Korrespondenz Abwasser*, 56(2), 144-152.

³⁹ Nadiri, A. A., Shokri, S., Tsai, F. T. C., & Moghaddam, A. A. (2018). Prediction of effluent quality parameters of a wastewater treatment plant using a supervised committee fuzzy logic model. *Journal of cleaner production*, 180, 539-549.

Mit Hilfe der zuvor beschriebenen Kanal- und Kläranlagenmodellbildung in SIMBA# wurden die benötigten Modelle zur Anpassung, Änderung und zum Erlernen der Wissensdarstellung und der Funktionsweise der Kläranlage Heringhausen inkl. zugehörigem Kanalnetz erstellt. Der nächste Schritt war es nun, mit Hilfe eines eigens entwickelten CBR-Algorithmus Realität und Erfahrungswissen (in Form der modellierten Lastfälle) zu vergleichen, so dass die Anlagenbedienenden in den unterschiedlichen Wetter- und Zuflusssituationen über das CBR-System einen Vorschlag bekommen, welcher Modelllastfall oder welche Modelllastfälle der aktuellen Realität am ehesten entsprechen und welche Steuerungsparameter sich daraus für den Kläranlagenbetrieb ergeben. Dazu werden die aktuellen Echtzeitdaten aus dem vorhandenen SCADA-System (Monitoringsoftware für das gesamte Abwassersystem) sowie die mit SIMBA# ermittelten Lastfalldaten zur CBR-Berechnung herangezogen. In der CBR-Berechnung werden die Auswahlparameter der Lastfälle mit den Realwerten verglichen und in entsprechende mathematische Beziehungen gesetzt. Hierbei werden insbesondere die Zulaufdaten (Menge und Schmutzfracht), die Wetterdaten und die aktuelle Touristenauslastung (Einwohnerzahl) analysiert und mit den charakteristischen Parametern der Lastfälle verglichen. Werden die definierten Übereinstimmungen festgestellt, gilt ein identifizierter Lastfall als gültig und wird dem Betriebspersonal zur Anwendung vorgeschlagen. Da gerade in der Anfangsphase eine gewisse Unsicherheit beim Betriebspersonal bestand, wurden ergänzend auch Lastfälle mit etwas geringerer Übereinstimmung als definiert angezeigt werden, so dass das Betriebspersonal eine größere Fallauswahl hatte und daran lernen konnte, wie es dem System vertrauen kann. Dieser Weg erwies sich als zielführend, da es während der Inbetrieb- und Monitoringphase zu einer erhöhten Mitarbeiterfluktuation kam und damit ein erhöhter Aufwand an Einarbeitung erforderlich wurde.

4.2.2.4. CBR-Datenmodell

Durch erhebliche Verzögerungen beim Bau und Inbetriebnahme der Kläranlage Heringhausen (infolge der Covid-Pandemie) lagen zu Beginn der CBR-Entwicklung nur wenige belastbare Betriebsdaten der Neuanlage vor. Aus diesem Grund wurde mit der Gemeinde Diemelsee abgestimmt, dass ein erster CBR-Technologiedemonstrator auf die zuvor beschriebenen Lastfälle der SIMBA#- Simulation zurückgreift. Im Laufe der Entwicklungs- und Erprobungsphase können durch den Auftraggeber weitere reale Lastfälle in das System eingepflegt werden, sodass sich dann die Datenbasis und die Qualität der Prognose sukzessive verbessert. Die softwaretechnische Umsetzung erfolgte auf Basis der Software „myCBR“ in der Softwareumgebung „Protégé“ (kostenlos verfügbare Open-Source-Software⁴⁰).

⁴⁰ DFKI. (2022). Online-Präsenz für das CBR Tool my CBR. Von <http://bycbr-project.org> abgerufen

Die Modellerstellung erfolgte nach den folgenden Schritten⁴¹:

1. Implementierung von myCBR in Protégé
2. Informationsgewinnung über relevante Parameter
3. Einspeisung der Daten in myCBR
4. Kalibrierung der Fälle

Um das System am Anfang möglichst einfach zu halten, wurde die Ähnlichkeitssuche auf die folgenden Parameter beschränkt, die vom Betreiber ohne großen Aufwand eingegeben werden können:

- Aktuelle Zulaufmenge [m^3/d] – Diese Information stellt das SCADA-System in Echtzeit zur Verfügung
- Ferientag/Feiertag [-] – Diese Information ist dem Betriebspersonal (z.B. aus dem Kalender) ebenfalls bekannt
- Abwassertemperatur [$^{\circ}\text{C}$] - Diese Information stellt das SCADA-System in Echtzeit zur Verfügung
- Wochentag [-] – Diese Information ist dem Betriebspersonal (u.a. aus dem Kalender) ebenfalls bekannt

Die in Echtzeit erfasste aktuelle Zulaufmenge lässt indirekt Rückschlüsse auf die aktuelle Schmutzstoffbelastung zu (d.h. Regenwetter, Fremdwasseranfall, Tourismus), da es hierzu lineare Zusammenhänge gibt. Da der Diemelsee ein Naherholungsgebiet ist, steigt die Belastung an Feiertagen und Ferientagen erfahrungsgemäß stark an; hingegen ist die Belastung an normalen Wochentagen geringer.

Gleichwohl ist die Belastung nicht an allen Werktagen gleich, da der Trend zum verlängerten Wochenende dazu führt, dass die Belastungen an Montagen und Freitagen erfahrungsgemäß höher ist als an einem Dienstag, einem Mittwoch oder einem Donnerstag. Die Abwassertemperatur hat einen großen Einfluss auf die biologischen Prozesse und damit auf die Reinigungsleistung.

Eine Übersicht über die in myCBR integrierten Fälle zeigt Abbildung 21.

⁴¹ Chabrowski, K. (2022). Überlegungen zum Einsatz von Case-Based Reasoning zur Erkennung der Zulaufbelastung einer SBR-Kläranlage. Magdeburg: Bachelorarbeit an der Hochschule Magdeburg Stendal (unveröffentlicht).

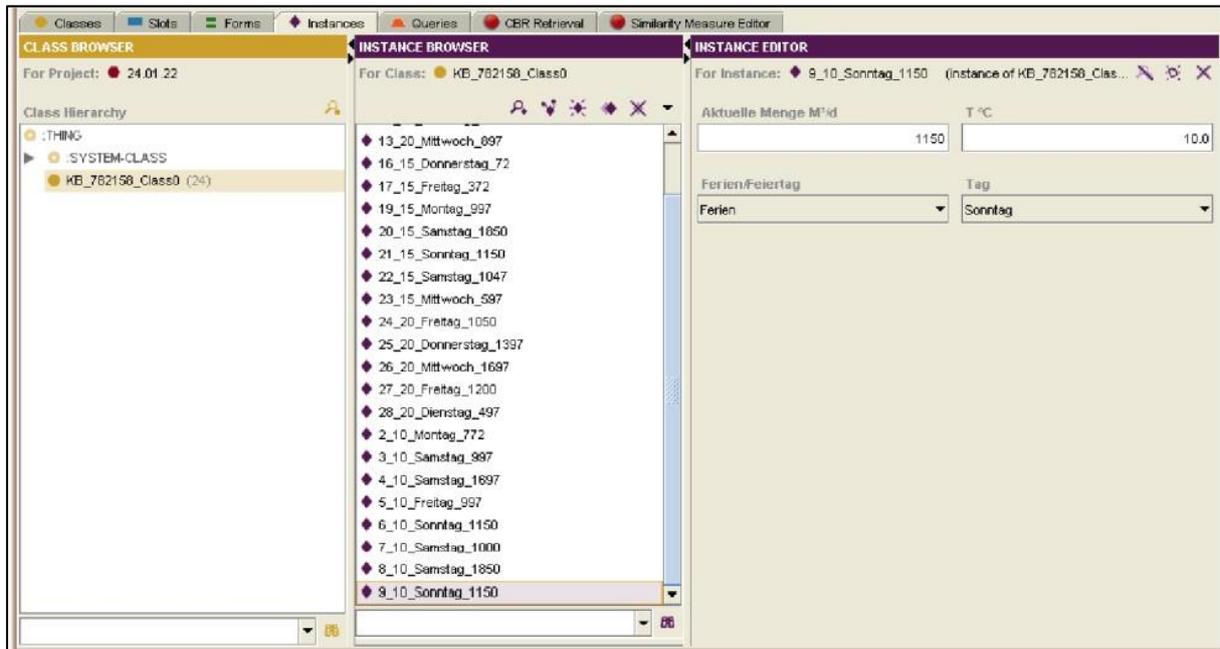


Abbildung 21: Fallübersicht „KA Heringshausen“ in myCBR⁴¹

Im nächsten Schritt wurde damit begonnen, Ähnlichkeitsmerkmale zu definieren, damit geeignete Fälle aus der Datenbank identifiziert werden können. Hierzu kamen verschiedene Ansätze zur Erkennung von Ähnlichkeiten (Similarity Measure Functions) zur Anwendung. Wurde bei den Wochentagen mit einer Matrixähnlichkeit (Abbildung 22) gearbeitet, so kam der Abwassertemperatur und der Zulaufmenge ein Ansatz nach dem Euklidischen Distanzmaß (Abbildung 23) zur Anwendung („Ein Wert der nahe am Zielwert ist, wird höher gewichtet, als ein Wert der weiter entfernt vom Zielwert liegt“). Für das Ähnlichkeitskriterium „Ferien-/Feiertag“ reichte ein einfacher Abgleich (Ja/Nein). Nach diesen Vorarbeiten kann mit der Identifizierung ähnlicher Fälle begonnen werden (Case Retrieval). Ein beispielhaftes Case Retrieval ist in Abbildung 12 dargestellt: Der Abfragefall (Query), ein Samstag außerhalb der Ferienzeit mit einem Tageszufluss von 450 m³/d und einer Abwassertemperatur von 20 °C, führt dazu, dass aus der Datenbank der Fall „28_20_Dienstag_497“ als ähnlichste Lösung herausgesucht wurde. Der Zufluss lag im Vergleichsfall mit 497 m³/d nur ca. 10 % neben dem Vorgabewert, bei den Ähnlichkeitswerten „Ferientag/Feiertag“ bzw. Abwassertemperatur gab es eine Übereinstimmung, lediglich beim Wochentag gab es Unterschiede (Samstag vs. Dienstag); die beiden anderen Fälle waren hingegen von der Ähnlichkeit deutlich schlechter.

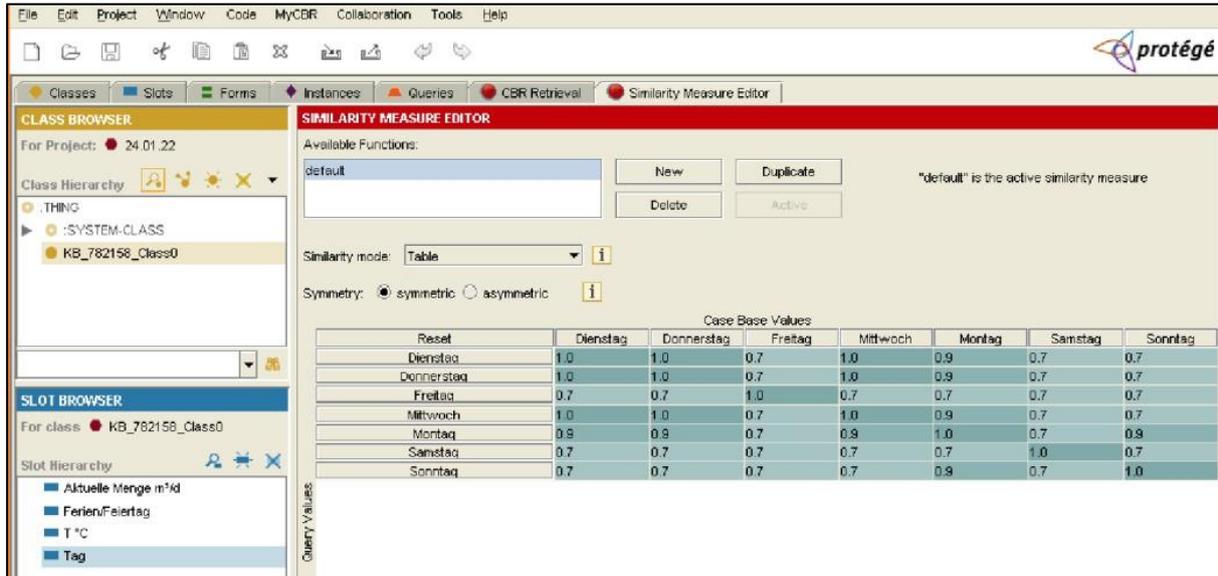


Abbildung 22: Similarity Measure Function für das Ähnlichkeitskriterium „Wochentag“ in myCBR ⁴¹

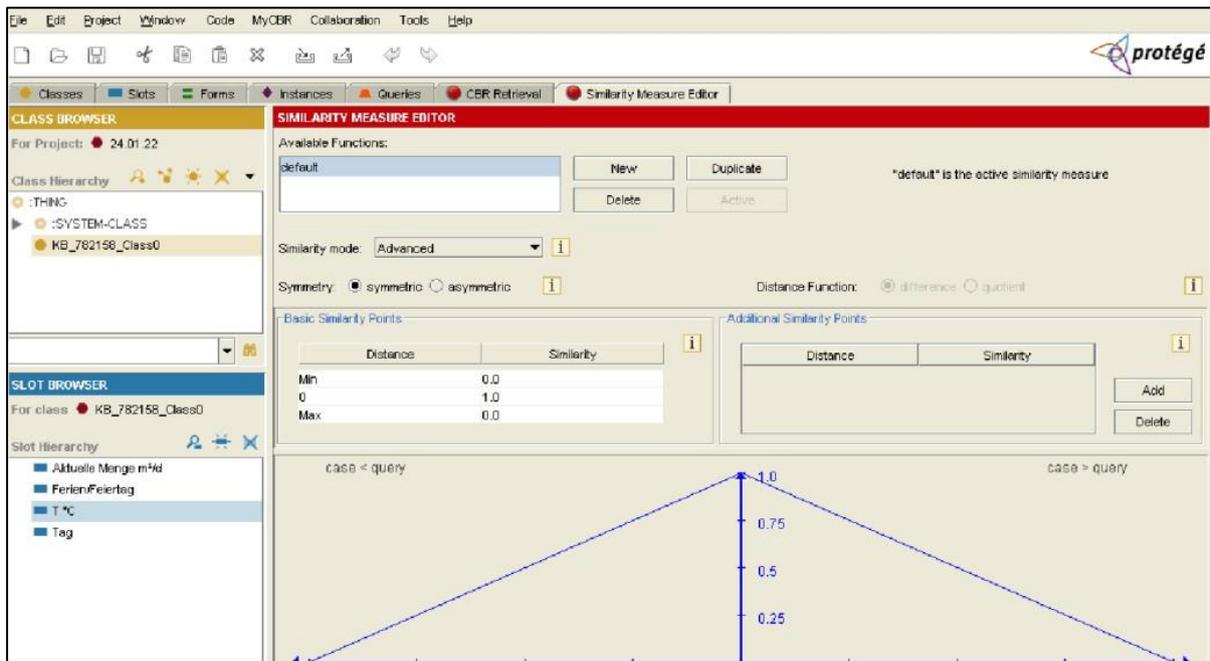
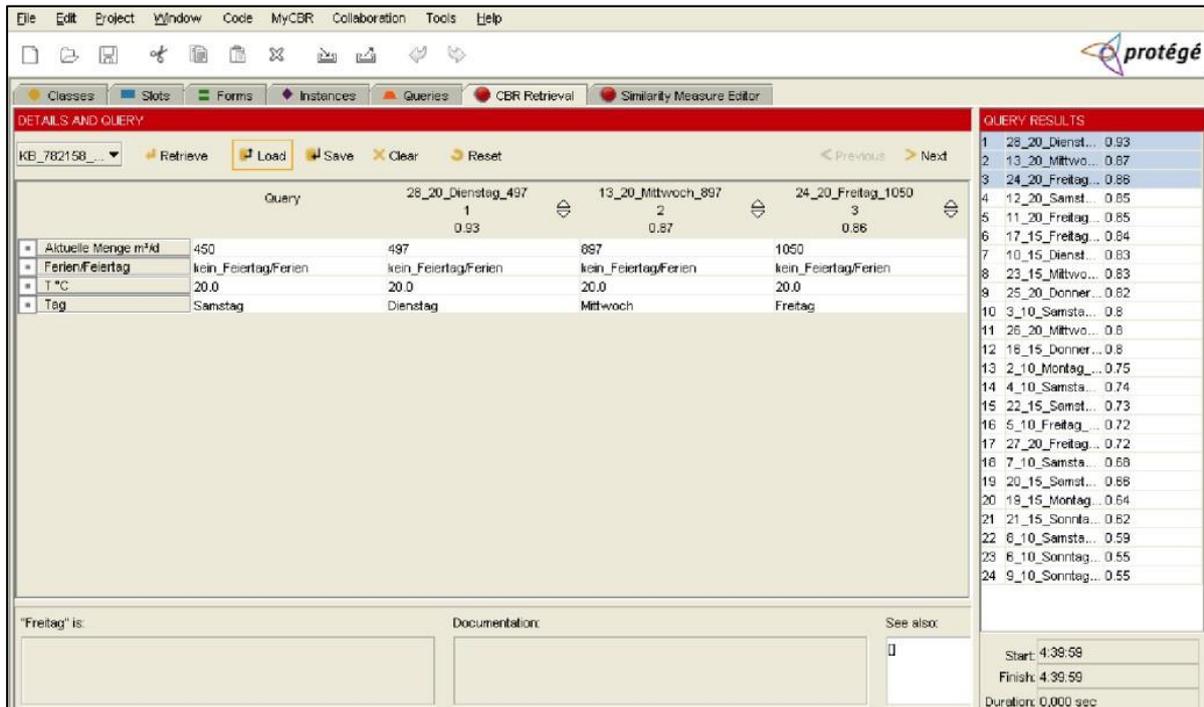


Abbildung 23: Similarity Measure Function für das Ähnlichkeitskriterium „Abwassertemperatur“ in myCBR ⁴¹



MyCBR - Similarity Measure Editor

KB_782158_... Retrieve Load Save Clear Reset

Query	28_20_Dienstag_497	13_20_Mittwoch_897	24_20_Freitag_1050	
	1	2	3	
	0.93	0.87	0.86	
Aktuelle Menge m³/d	450	497	887	1050
Ferien/Feiertag	kein_Feiertag/Ferien	kein_Feiertag/Ferien	kein_Feiertag/Ferien	kein_Feiertag/Ferien
T °C	20.0	20.0	20.0	20.0
Tag	Samstag	Dienstag	Mittwoch	Freitag

QUERY RESULTS

- 28_20_Dienstag... 0.93
- 13_20_Mittwo... 0.87
- 24_20_Freitag... 0.86
- 12_20_Samst... 0.85
- 11_20_Freitag... 0.85
- 17_15_Freitag... 0.84
- 10_15_Dienst... 0.83
- 23_15_Mitwo... 0.83
- 25_20_Donner... 0.82
- 3_10_Samsta... 0.8
- 26_20_Mitwo... 0.8
- 16_15_Donner... 0.8
- 2_10_Montag... 0.75
- 4_10_Samsta... 0.74
- 22_15_Samst... 0.73
- 5_10_Freitag... 0.72
- 27_20_Freitag... 0.72
- 7_10_Samsta... 0.68
- 20_15_Samst... 0.68
- 19_15_Montag... 0.64
- 21_15_Sonnta... 0.62
- 6_10_Samsta... 0.59
- 6_10_Sonntag... 0.55
- 9_10_Sonntag... 0.55

Start: 4:39:59
Finish: 4:39:59
Duration: 0,000 sec

Abbildung 24: Exemplarisches Case Retrieval ⁴¹

4.2.3. Einsatz CBR-Modell

Im Zuge des Monitorings stellte sich heraus, dass sich ein wesentlicher Lastfallfaktor verändert hatte, hierbei handelte es sich um den Anteil Fremdwasser im Zufluss zur KA Heringhausen. Dieser wurde aufgrund von früheren Messungen für die Lastfallsimulationen mit 50-80 % der Tageszulaufmenge angenommen. Die Auswertung der Betriebstagebücher 2021 und 2022 hat allerdings gezeigt, dass der Fremdwasseranteil erheblich abgenommen hat, und zwar auf rd. 16 % (2021: 16 %, 2022: 16,7 %). Hierfür wurden folgende Gründe identifiziert:

- Die Messdaten von der alten Kläranlage waren ungenau
- In den Jahren bis zur Inbetriebnahme der neuen Kläranlage wurden mehrere Kanalsanierungen durchgeführt
- Der Grundwasserspiegel des Diemelsee ist in den letzten Jahren durch die geringen Niederschläge gesunken

So wurden alle Lastfälle aus der CBR-Analyse herausgenommen, die einen hohen Fremdwasseranteil beinhalteten.

Insgesamt wurde die Auswahl auf 10 Fälle beschränkt, diese stellen nach Abstimmung mit der Diemelsee Abwasser GmbH eine ausreichende Darstellung der repräsentativen Fälle dar. Das System ist so gestaltet, dass weitere Fälle bei Bedarf ergänzt werden können.

Tabelle 6 zeigt das Ergebnis eines CSV-Exports am 29.08.2022. Aus den umfassenden Voranalysen und Bewertung der Simulationen wurden letztendlich vier Referenzkriterien definiert: die Anzahl der angeschlossenen Einwohner (EW), das aktuelle Wetter (Wetterschlüssel), die Tourismussituation (Fall) sowie die tägliche Abwassermenge (Zulaufmenge). Diese vier Kriterien werden als Echtzeitinformationen, per Handeingabe oder durch Umrechnung (z.B. Tourismussituation wird nach dem aktuellen Datum automatisch aus einem digitalen Kalender abgeleitet) im SCADA-System erfasst und als Datensatz wie in Tabelle 6 gezeigt, an die myCBR-Software übertragen.

In der myCBR-Software sind alle bisherigen 20 Lastfälle eingetragen und enthalten die Ergebnisse der vier Bewertungskriterien. myCBR vergleicht nun den vom SCADA empfangenen Datensatz mit den hinterlegten Ergebnissen der Lastfälle und gibt die Wahrscheinlichkeiten der Übereinstimmung aus. Tabelle 6 zeigt das Ergebnis für die festgelegte Wahrscheinlichkeitsgrenze von > 85 %. CASE1, CASE 4 und CASE 7 überschreiten den gesetzten Grenzwert.

Tabelle 6: CSV-Export der Datenkommunikation zwischen SCADA und myCBR

SCADA-Daten zu myCBR	29.08.2022	06:10:00				
	Bezeichnung	Wert				
	EW	584.0				
	Wetterschlüssel	1.0	Trockenwetter			
	Fall	2.0	Sommersaison			
Zulaufmenge	348.0	m ³ /d				
myCBR-Daten zu SCADA	29.08.2022	06:15:00	Lastfall	> 85 % 1 = (ja / 0 = nein)		Wahrscheinlichkeit
			CASE1	1	MATCH1	85,85
			CASE2	0	MATCH2	10,2
			CASE3	0	MATCH3	20,5
			CASE4	1	MATCH4	98,85
			CASE5	0	MATCH5	22,1
			CASE6	0	MATCH6	1
			CASE7	1	MATCH1	90,25
			CASE8	0	MATCH8	23,54
			CASE9	0	MATCH9	7,23
			CASE10	0	MATCH10	3,28

Nach erfolgter Analyse im myCBR und Ergebnisübertragung in das SCADA erscheint für den Bediener eine entsprechende Maske, wie sie beispielhaft in Abbildung 25 für eine Wahrscheinlichkeitsgrenze von > 50 % dargestellt ist. In der aktuellen Version erfolgt die Eingabe des aktuellen EW-Wertes und der Wettersituation per Handeingabe in das Menü am unteren linken Bildrand. Der Bediener startet die CBR-Berechnung per Aktivierung des entsprechenden Buttons und sieht anschließend alle in Frage kommenden Lastfälle aus der Berechnung. Anhand der Ergebnisse der Simulationsanalysen kann das Betriebspersonal nun die entsprechenden Fälle anschauen und eine Entscheidung treffen, welche Sollwerte zu verwenden sind. Die ursprüngliche SCADA-Maske für die Ergebnisübertragung in das SCADA mit 20 Fällen zeigt Abbildung 26.

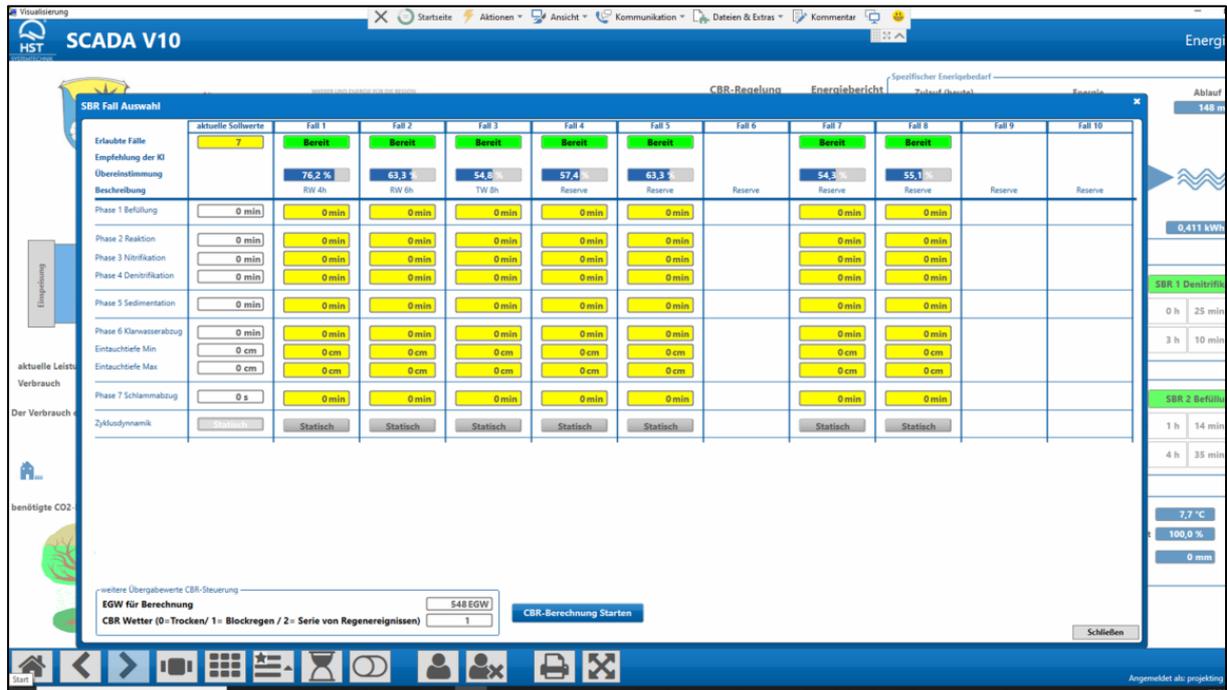


Abbildung 25: Für den Bediener sichtbares Ergebnis der Datenkommunikation zwischen SCADA und myCBR mit 10 Fällen

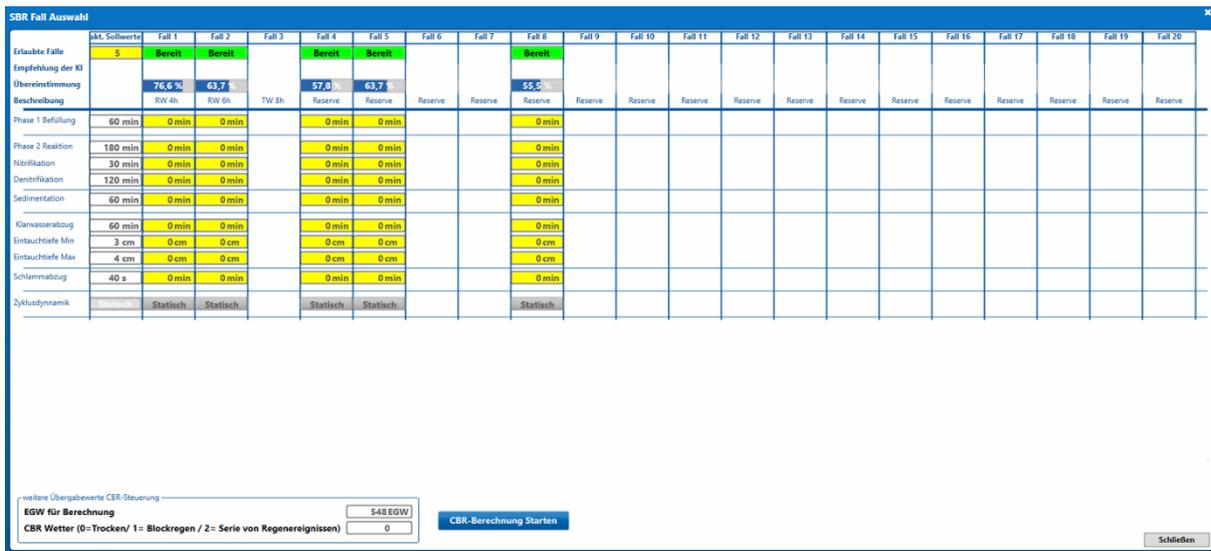


Abbildung 26: Für den Bediener sichtbares Ergebnis der Datenkommunikation zwischen SCADA und myCBR mit 20 Fällen

5. Monitoring

5.1. Untersuchungsaufbau

5.1.1. Auswertung Onlinedaten (SCADA)

Die Auswertung der Onlinedaten musste sich auf die Untersuchung der Energiedaten (siehe Kapitel 5.2.1) beschränken. Im Zuge der Untersuchung wurde festgestellt, dass die Qualitätsparameter $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$ der Onlinesensoren fehlerhaft waren und starke Abweichungen zu den manuellen Datenerhebungen festgestellt wurden.

5.1.2. Begleitende Probenahme und -analyse

Um die Plausibilität der Onlinemessungen (siehe 5.1.1) zu überprüfen, erfolgte eine Analyse der manuellen Datenerhebungen der Eigenkontrolle des Anlagenbetriebs. Ergänzend wurden eigene manuelle Datenerhebungen durchgeführt. Nähere Angaben dazu finden sich in Kapitel 5.2.

5.2. Ergebnisse

5.2.1. Frachtanalyse

Zur Bestimmung der Zulaufbelastung, die für die genaue Zuordnung des spezifischen Energieverbrauchs relevant ist, wurden die Onlinezulaufmengenmessung sowie die Laboranalyse der Abwasserparameter ausgewertet. Aufgrund von Fehlern in der Onlinezulaufmengenmessung bis in die erste Jahreshälfte 2023 konnte nur auf plausible Qualitätsdaten des Zeitraums von Juni 2023 bis Mai 2024 zurückgegriffen werden. Als Bezugsparameter wurde der CSB im Zulauf gemäß DWA A 131 ausgewählt⁴².

Abbildung 27 zeigt den Verlauf der EW-Belastung anhand der Stichproben des Monitorings im genannten Zeitraum. An einzelnen Tagen lag die Belastung bei 344 EW und im Maximalfall wurde eine Belastung von 5.271 EW ermittelt. Der Mittelwert im Untersuchungszeitraum lag bei 1.312 EW.

Um den Verlauf auch über die Jahreszeiten und insbesondere in den verschiedenen Tourismuszeiten zu bewerten, erfolgte eine Auswertung über einen monatlichen Mittelwert, dies ist in Abbildung 28 dargestellt. Hier schwanken die Werte zwischen rd. 700 und 3.500 EW. Als Mittelwert ergibt sich 1.317 EW. Es sei anzumerken, dass sich seit dem Zeitpunkt der Anlagenplanung zwei touristische Aspekte stark verändert haben. Einerseits steigt die Zahl der Camper und Kurzurlauber nach der COVID-Pandemie (mehr Urlaub in Deutschland), andererseits wurde ein erwarteter Peak an Tagestouristen durch den Wegfall einer geplanten speziellen Hängebrücke auf ein touristisches Highlight nicht erreicht.

⁴² 120 g CSB/EW

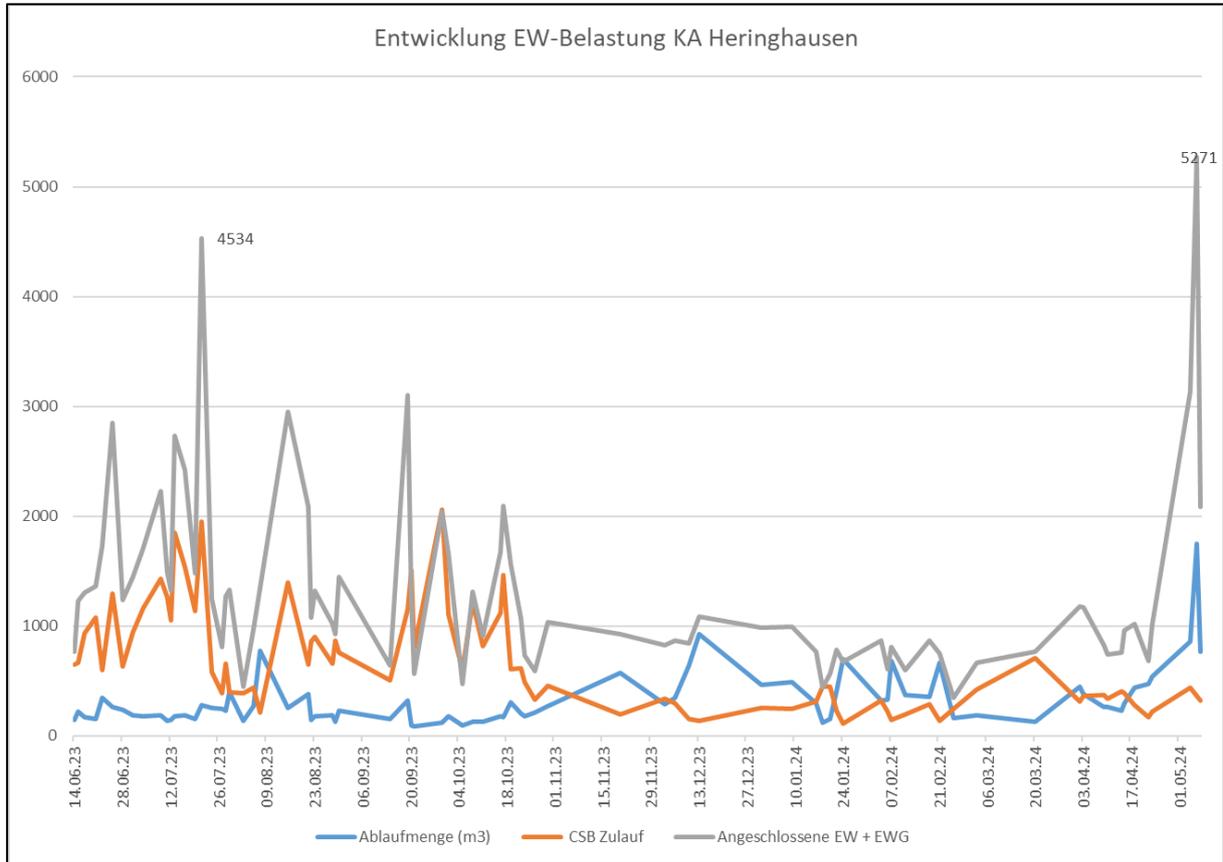


Abbildung 27: Entwicklung EW-Belastung KA Heringhausen Zeitraum Juni 2023 bis Mai 2024

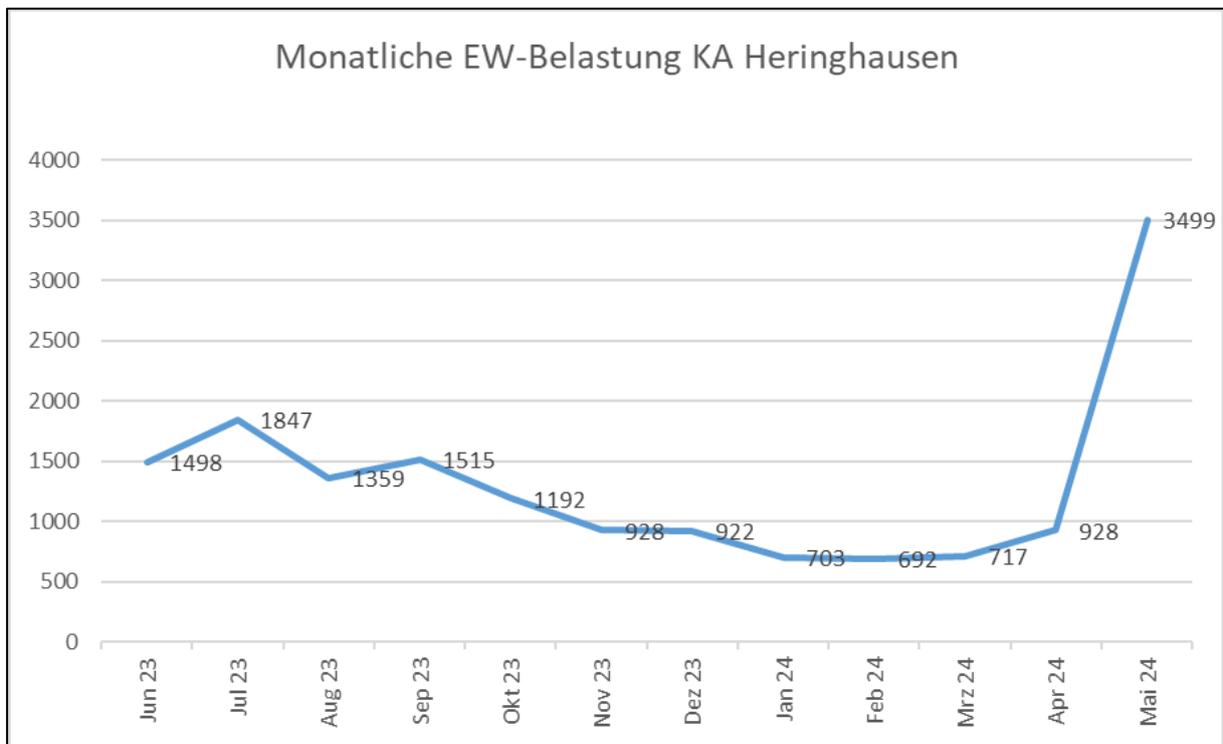


Abbildung 28: Monatliche EW-Belastung KA Heringhausen Zeitraum Juni 2023 bis Mai 2024

5.2.2. Energieanalyse

5.2.2.1. Energiedaten der Planungsphase

Wie in Tabelle 1 dargestellt, beträgt der in der Planungsphase berechnete Energieverbrauch der Standardausführung 343.644,66 kWh/a. Da diese Art der Energieberechnung auf Basis des Tagesspitzenwertes erstellt wird, würde dies für den Jahreswert bei einer 100 %-Auslastung über 24 h und 365 Tage darstellen. Dies ist eine unrealistische Berechnung. Daher wird auf Basis von Erfahrungswerten⁴³ für Anlagen dieser Art in Tourismusgebieten eine mittlere Auslastung von 50 % angenommen, so wird von einem Jahresverbrauchswert von 171.832 kWh ausgegangen. Bezogen auf den nominellen Auslegungswert von 1.980 EW ergibt sich ein spezifischer Energieverbrauch mit 86,78 kWh/EW. Die Anlage kann aber rechnerisch kurzzeitig eine Kapazität von bis zu 4.500 EW aufnehmen (in Realität auch mehr), so dass für Energieverbrauchsanalyse eine mittlere Auslastung von 3.000 EW anzusetzen ist. Dies entspricht dem Belastungsband der Frachtanalyse in den wesentlichen Tourismusphasen gemäß Kapitel 5.2.1, dargestellt in Abbildung 29. So beträgt der anzusetzende spezifischer Energieverbrauch 57,27 kWh/EW.

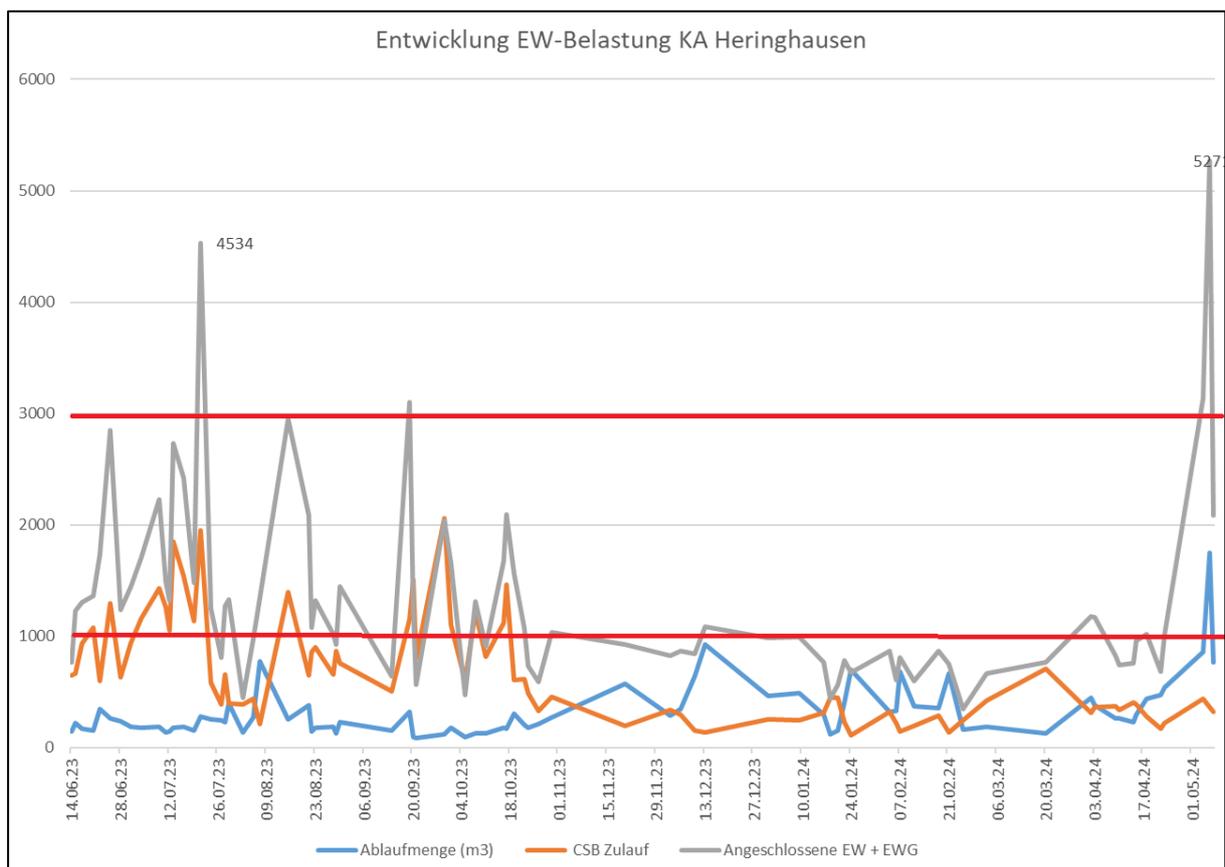


Abbildung 29: Frachtband maximale EW-Belastung KA Heringhausen Zeitraum Juni 2023 bis Mai 2024

⁴³ Prof. Müller-Czygan ist seit mehr als 25 Jahren Planer von Abwasserbehandlungsanlagen, speziell mit dem SBR-Verfahren.



Die in Heringhausen vorgesehene SBR-Technik galt bereits vor der Ideenentwicklung zum UIP-Antrag „Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0“ im Vergleich zu den anderen am Markt erhältlichen SBR-Lösungen als innovativ und energieeinsparend. Um die Unterschiede zwischen den weiterhin am Markt erhältlichen Standard-SBR und der innovativen SBR-Lösung Heringhausen mit in die Bewertung einfließen zu lassen, zeigt Tabelle 7 die Energiebilanz für die innovativen SBR-Lösung. Danach beträgt der erwartete Energieverbrauch durch angepasste Steuerungsalgorithmen, die in erster Linie die Gebläseleistung dem tatsächlichen Sauerstoffbedarf anpassen, 258.692,66 kWh/a. Bei der anzunehmenden mittleren Auslastung von 50 % ergebenen sich entsprechend 129.346,33kWh/a. Grundlage der weiteren Energievergleiche ist daher die Energiebilanz der innovativen SBR-Lösung ohne CBR-Steuerung. Bezogen auf den nominellen Auslegungswert von 1.980 EW ergibt sich ein spezifischer Energieverbrauch mit 53,57 kW/EW, für bis zu 3.000 EW beträgt der anzusetzende spezifischer Energieverbrauch 43,12 kW/EW.

Tabelle 7: Energieberechnung Planungsphase Kläranlage Heringhausen für moderne SBR-Anlage (Quelle: Südwest Consult)

L. Nr. / Rel	Funktion	Leistung Aggregat			Wirtschaftlichkeit			
		Aggregat	Leistung in kW	Wirkungsgrad (coef)	Stromaufnahme in A	Laufzeit pro Tag in Stunden	Energiebedarf pro Tag in kWh	Energiebedarf pro Jahr
Aggregatgruppe: 01.2 - Mechanische Reinigung								
Zulauf MID	A-DF	0,10	0,00	1,00	24,00	2,40	876,00	
Differenzm. Vor dem Rechen	A-NIU	0,10	0,00	1,00	24,00	2,40	876,00	
Differenzm. Vor dem Rechen	A-NIU	0,00	0,00	0,00	24,00	0,00	0,00	
Rechen - Antrieb	M-DI	1,50	0,80	3,10	3,00	4,50	1.642,50	
Rechengut Waschpresse	M-DI	2,50	0,80	5,50	3,00	7,50	2.737,50	
Rechen - Mag. Ventil Spülung 1	M-VE	0,20	0,80	1,00	0,25	0,05	18,25	
Rechen - Mag. Ventil Spülung 2	M-VE	0,20	0,80	1,00	0,25	0,05	18,25	
Bodenförderer Sandaustrag	M-DI	0,55	0,80	1,60	3,00	1,65	602,25	
Raumventilator	M-DI	0,58	0,80	1,30	3,00	1,74	635,10	
Kombinierte H2S/CH4-Messung	A-NID	0,20	0,80	2,00	24,00	4,80	1.752,00	
Aggregatgruppe: 01.03 - Sandfang								
Sandklassierer	M-DI	0,75	0,80	2,10	3,00	2,25	821,25	
Sandfang Belüftung	M-DI	0,55	0,80	2,20	3,00	1,65	602,25	
Sandfang Belüftung Mag. Ventil	M-VE	0,20	0,80	1,00	0,25	0,05	18,25	
Sandfang - Kompressor	M-DI	2,20	0,80	3,97	24,00	52,80	19.272,00	
Sandfang - Förderpumpe	M-DI	1,30	0,80	2,80	3,00	3,90	1.423,50	
pH-Messung	A-AY	0,02	0,20	24,00	0,48	175,20	175,20	
Fettfangpumpe	M-DI	0,18	0,75	2,25	3,00	0,54	197,10	
Fettfangkompressor	M-DI	1,50	0,80	5,00	3,00	4,50	1.642,50	
Aggregatgruppe: 01.04 - MAB								
MAB - Füllstandmessung	A-NID	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
MAB - Pumpe 1	M-SA	9,00	0,80	34,10	8,00	72,00	26.280,00	
MAB - Pumpe 2	M-SA	9,00	0,80	34,10	8,00	72,00	26.280,00	
MAB - Rührwerk	M-SI	3,50		8,00				
Aggregatgruppe: 01.05 - SBR 1								
SBR 1 - Füllstandmessung	A-NID	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
SBR 1 - O2-Messung	A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
SBR 1 - Temperatur Messung	A-AYS	0,00		0,00	24,00	0,00	0,00	
SBR 1 - NH4 Messung	A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
SBR 1 - NO3 Messung	A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
SBR 1 - TS Messung	A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
SBR 1 - Trübungs-Messung	A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
SBR 1 - Druckentlastungsventil (Belüfterplatten)	M-VE	0,10	0,80	0,20	0,25	0,03	9,13	
SBR 1 - Absperrklappe O2 Zufuhr	M-SI	0,35		1,40	0,25	0,09	31,94	
SBR 1 - ÜS Pumpe	M-DI	2,65	0,80	6,90	1,00	2,65	967,25	
SBR 1 - Rührwerk 1	M-DI	2,70	0,80	3,00	1,00	2,70	985,50	
SBR 1 - Rührwerk 2	M-DI	2,70	0,80	3,00	1,00	2,70	985,50	
SBR 1 - Hydroklar Dekanter	M-SI	0,37	0,70	1,60	0,50	0,19	67,53	
Aggregatgruppe: 01.6 - SBR 2								
SBR 2 - Füllstandmessung	A-NID	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
SBR 2 - O2-Messung	A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
SBR 2 - Temperatur Messung	A-AYS	0,00		0,00	24,00	0,00	0,00	
SBR 2 - NH4 Messung	A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
SBR 2 - NO3 Messung	A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
SBR 2 - TS Messung	A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
SBR 2 - Trübungs-Messung	A-AYS	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
SBR 2 - Druckentlastungsventil (Belüfterplatten)	M-VE	0,10	0,80	0,20	0,25	0,03	9,13	
SBR 2 - Absperrklappe O2 Zufuhr	M-SI	0,35		1,40	0,25	0,09	31,94	
SBR 2 - ÜS Pumpe	M-DI	2,65	0,80	6,90	1,00	2,65	967,25	
SBR 2 - Rührwerk 1	M-DI	2,70	0,80	3,00	1,00	2,70	985,50	
SBR 2 - Rührwerk 2	M-DI	2,70	0,80	3,00	1,00	2,70	985,50	
SBR 2 - Hydroklar Dekanter	M-SI	0,37	0,70	1,60	0,50	0,19	67,53	
Aggregatgruppe: 01.07 - Gebläse								
Gebläse 1	M-FU	15,00	0,80	30,00	11,00	165,00	60.225,00	
Gebläse 2	M-FU	15,00	0,80	30,00	11,00	165,00	60.225,00	
Druckmessung Hauptleitung Belüftung	A-DR	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
Gebläseraum - Thermostat	A-KO	0,00	0,70	0,10	24,00	0,02	8,76	
Gebläseraum - Ventilator	M-DI	0,14	0,70	0,35	1,00	0,14	51,10	
Temperatur - Innen	A-TEM	0,00	0,70	0,10	24,00	0,02	8,76	
Temperatur - Außen	A-TEM	0,00	0,70	0,10	24,00	0,02	8,76	
Aggregatgruppe: 01.08 - Schlammbehälter								
Schlammbehälter - Füllstand	A-NID	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
Schlammbehälter - Rührwerk 1	M-SA	4,50	0,80	9,40	1,00	4,50	1.642,50	
Schlammbehälter - Rührwerk 2	M-SA	4,50	0,80	9,40	1,00	4,50	1.642,50	
Schlammbehälter - Trübwasserpumpe	M-DI	2,00	0,80	3,65	1,00	2,00	730,00	
Aggregatgruppe: 1.10 - P-Fällung								
Fällmittelstation - Leckage	A-KO	0,02		0,20	0,00	0,00	0,00	
Fällmittelstation - Grenzscharter Max	A-KO	0,02		0,20	0,00	0,00	0,00	
Fällmittelstation - Grenzscharter Min	A-KO	0,02		0,20	0,00	0,00	0,00	
Fällmittelstation - Grenzscharter MinMin	A-KO	0,02		0,20	0,00	0,00	0,00	
Fällmittelstation - Dosierpumpe	M-DI	0,50	0,80	1,00	2,00	1,00	365,00	
Aggregatgruppe: 01.11 - UV Anlage								
Versorgung UV Anlage	LS-AG	2,00	0,70	4,13	4,00	8,00	2.920,00	
Durchfluss Auslauf	A-AY	0,02		0,20	24,00	0,48	175,20	
Stationärer Probennehmer	A-AY	1,00		4,35	24,00	24,00	8.760,00	
Aggregatgruppe: 01.12 - Brauchwasser								
Brauchwasserpumpe (mind. Druck 8 bar)	M-DI	3,70	0,80	9,00	6,00	22,20	8.103,00	
Druckschalter Brauchwasserpumpe	A-KO	0,05		0,20	24,00	1,20	438,00	
Aggregatgruppe: 01.13 - Gebäude Technik								
Licht und Steckdosen								
Rechengebäude - Licht + Steckdosen	INST	INST	0,50		2,17	1,00	0,50	182,50
Rechengebäude - Elektro Heizung	INST	INST	3,00		13,04	0,50	1,50	547,50
Rechengebäude - E Elektrant	INST	INST	2,00		8,70	1,00	2,00	730,00
SBR - Licht + Steckdosen	INST	INST	0,50		2,17	1,00	0,50	182,50
SBR - Elektro Heizung	INST	INST	3,00		13,04	0,50	1,50	547,50
SBR - E Elektrant	INST	INST	2,00		8,70	1,00	2,00	730,00
Außenbeleuchtung	INST	INST	3,00		13,04	0,50	1,50	547,50
Allgemein - Sonstiges								
Lastabgang Klima Anlage	EIGEN	3,00	0,80	13,04	14,00	42,00	15.330,00	
		0,00		0,00	24,00	0,00	0,00	
		0,00		0,00	24,00	0,00	0,00	
Anschlussleistung [kW]		113,46						
Energieverbrauch pro Tag [kWh/d]		314,51						
		450,55						
		258.692,66						

Eine Einordnung nach DWA-A 216 zeigt Abbildung 30. Demnach zeigen 56,1 % der Anlagen aus dem DWA-Benchmark eine bessere Bilanz für den Gesamtenergieverbrauch auf. Ähnlich verhält es sich mit 52,1 % im Bereich der Belüftungsenergie (Abbildung 31).



Abbildung 30: Vergleichsanalyse gesamter Energieverbrauch innovative SBR ohne CBR-Steuerung gemäß Energiecheck DWA-A 216

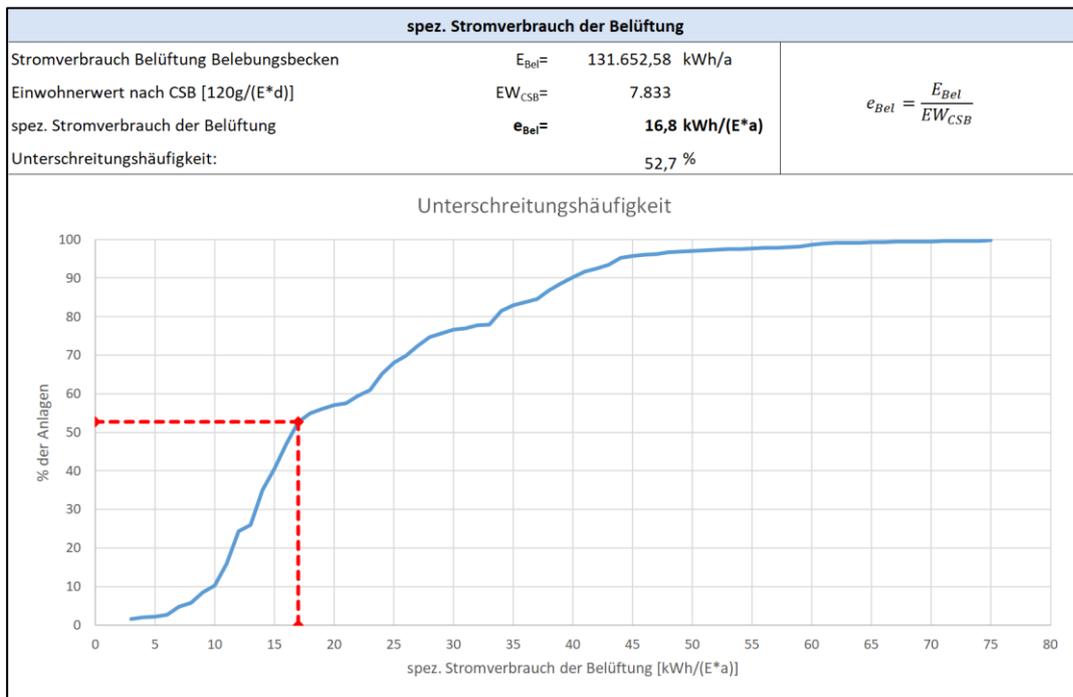


Abbildung 31: Vergleichsanalyse Belüftungsenergie innovative SBR ohne CBR-Steuerung gemäß Energiecheck DWA-A 216

5.2.2.2. Energiedaten aus dem Messzeitraum

Für die Analyse der Zielerreichung des UIP-Projektes „Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0“ wurde die KA Heringhausen mit einer erweiterten Energieverbrauchserfassung ausgestattet. Im Gegensatz zur üblichen Energieverbrauchserfassung in Kläranlagen vergleichbarer Größe wurden alle relevanten Aggregate- und Funktionsbereiche mit einer eigenen Energieverbrauchserfassung ausgestattet. Tabelle 8 zeigt die entsprechende Zuordnung, auf die sich die weitere Untersuchung und Auswertung stützt.

Tabelle 8: Energieverbrauchserfassung relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Zugeordnete Aggregate/Funktionen
MAB + Rechen	Zulaufpumpen, Zulaufschieber, Rechenanlage, Gebäudetechnik Rechenhalle, Schaltanlage MAB + Rechen
SBR 1	Rührwerke SBR 1, Überschussschlammpumpe SBR 1
SBR 2	Rührwerke SBR 2 Überschussschlammpumpe SBR 2
Gebläsestation	Gebläse 1 und Gebläse 2
Betriebsgebäude/SBR-Halle	Gebäudetechnik BG und SBR-Halle, Belüftungsschieber, Trübwasserpumpe
UV-Anlage	UV-Anlage, Ablaufschieber
Sonstige	Regenbecken

5.2.2.2.1. Jahresbetrachtung

Abbildung 32 und Abbildung 33 sowie Tabelle 9 und Tabelle 10 zeigen die Tageswerte die digital per SCADA erfassten Energieverbrauchsdaten der einzelnen Aggregate- und Funktionsbereiche gemäß Tabelle 8 für die Jahre 2022 und 2023.

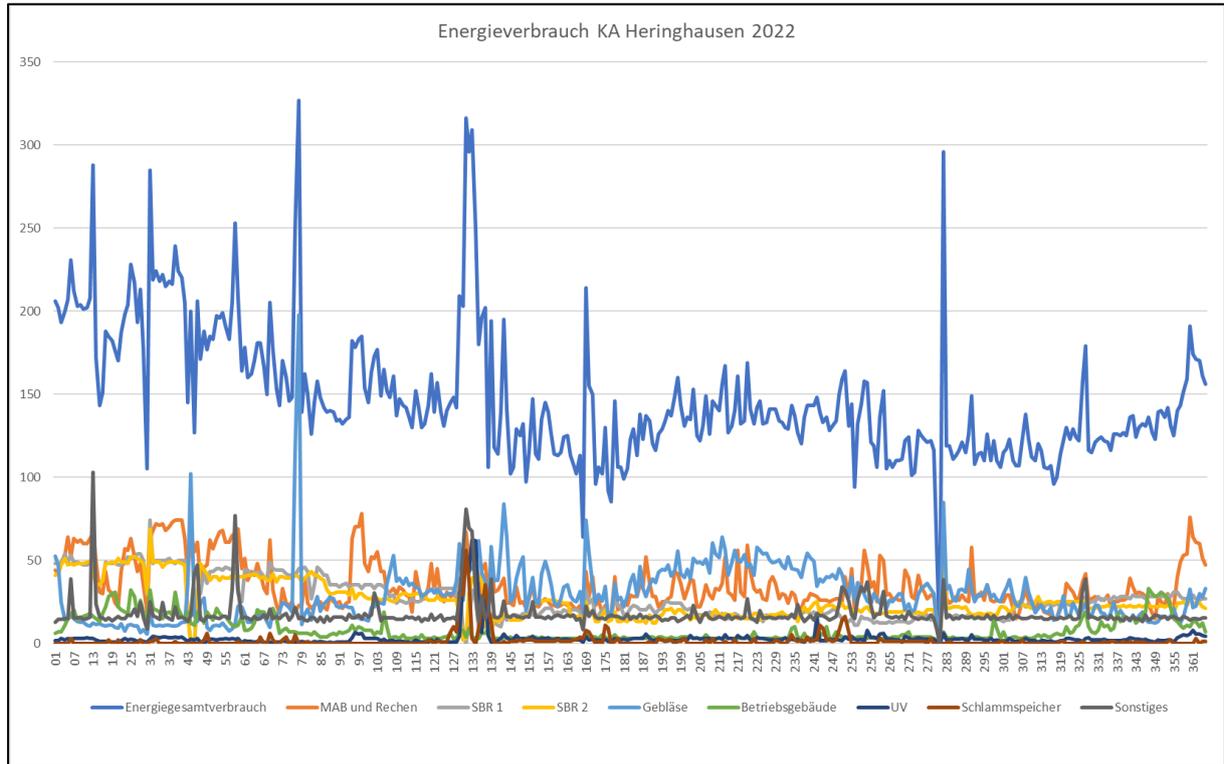


Abbildung 32: Onlineenergiedaten KA Heringhausen 01.01.2022 – 31.12.2022

Table 9: Statistik Energieverbrauchserfassung 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/a]
MAB + Rechen	0	78	35	12.892
SBR 1	0	74	27	9.691
SBR 2	0	69	26	9.517
Gebläsestation	0	197	30	10.779
Betriebsgebäude/SBR-Halle	0	89	10	3.561
UV-Anlage	0	62	3	1.138
Sonstige	0	103	18	6.475
Gesamtanlage (Σ)	0	672	149	54.053

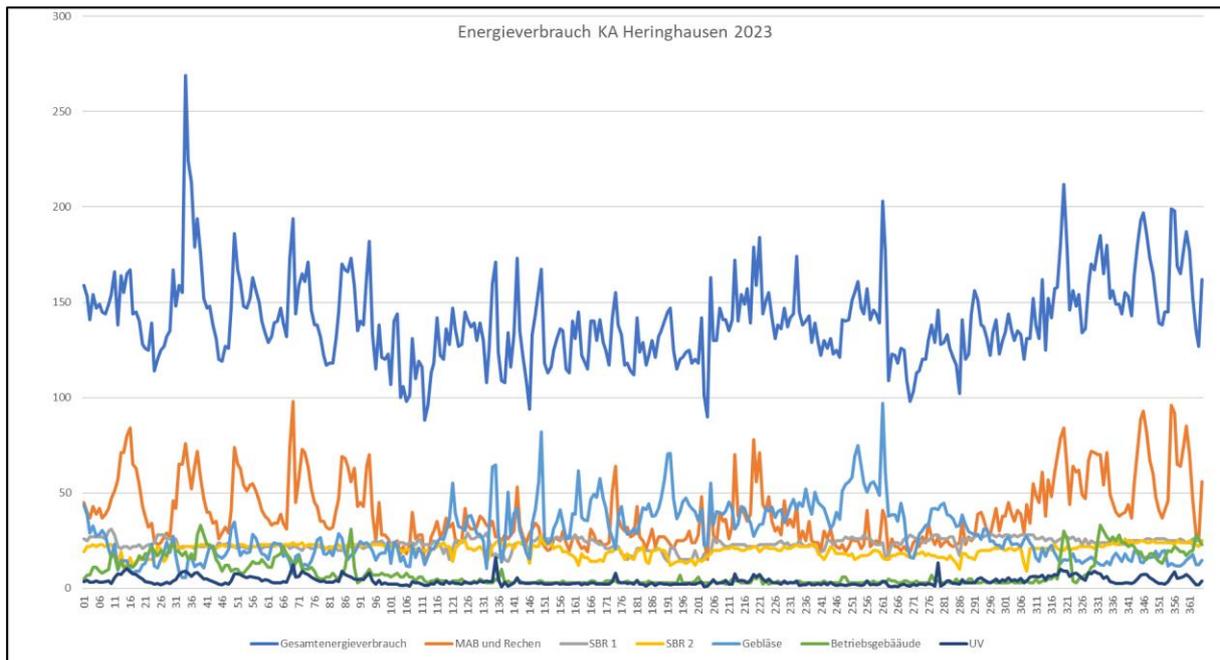


Abbildung 33: Onlineenergiekosten KA Heringhausen 01.01.2023 – 31.12.2023

Tabelle 10: Statistik Energieverbrauchserfassung 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/a]
MAB + Rechen	13	98	39	14.264
SBR 1	14	31	23	8.571
SBR 2	9	28	20	7.378
Gebläsestation	5	97	29	10.423
Betriebsgebäude/SBR-Halle	2	33	16	3.021
UV-Anlage	1	16	4	1.411
Sonstige				6.391
Gesamtanlage (Σ)	44	303	131	51.459

Beide Untersuchungsjahre zeigen ähnliche Gesamt- und Mittelwerte (siehe Abbildung 34 und Abbildung 35).

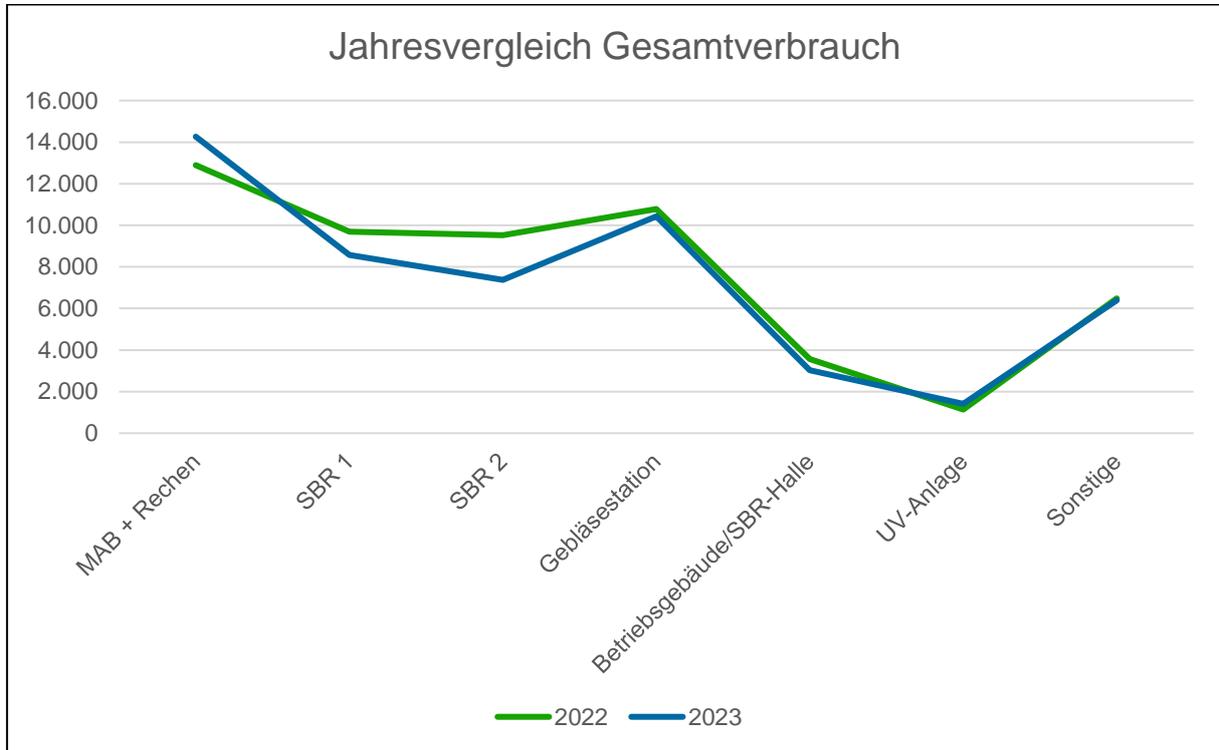


Abbildung 34: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Gesamtjahresverbrauch 2022 und 2023

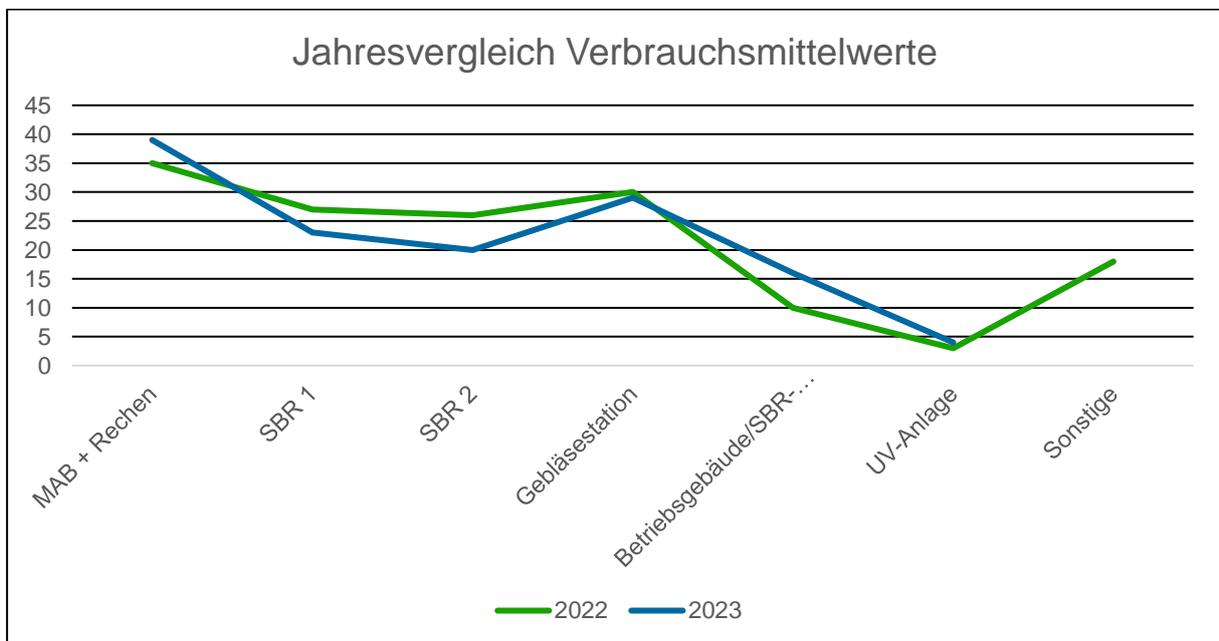


Abbildung 35: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Verbrauchsmittelwerte 2022 und 2023

5.2.2.2. Monatsbetrachtung

Nachfolgend sind die Monatsdaten der Jahre 2022 und 2023 dargestellt.

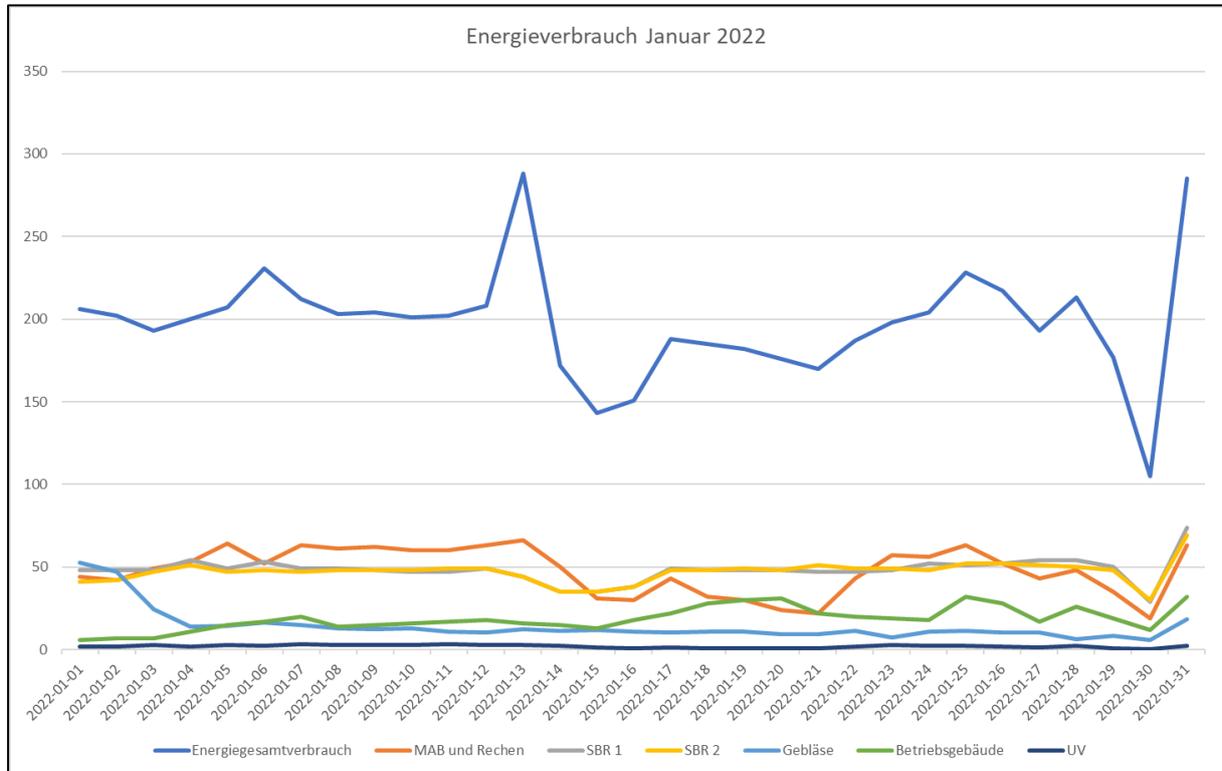


Abbildung 36: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Januar 2022

Tabelle 11: Energieverbrauchserfassung Januar 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	19	66	49	1.480
SBR 1	29	74	45	1.492
SBR 2	30	69	47	1.459
Gebläsestation	6	53	14	442
Betriebsgebäude/SBR-Halle	6	32	19	581
UV-Anlage	1	3	2	61
Sonstige	9	106	20	616
Gesamtanlage (Σ)	100	403	176	6.131

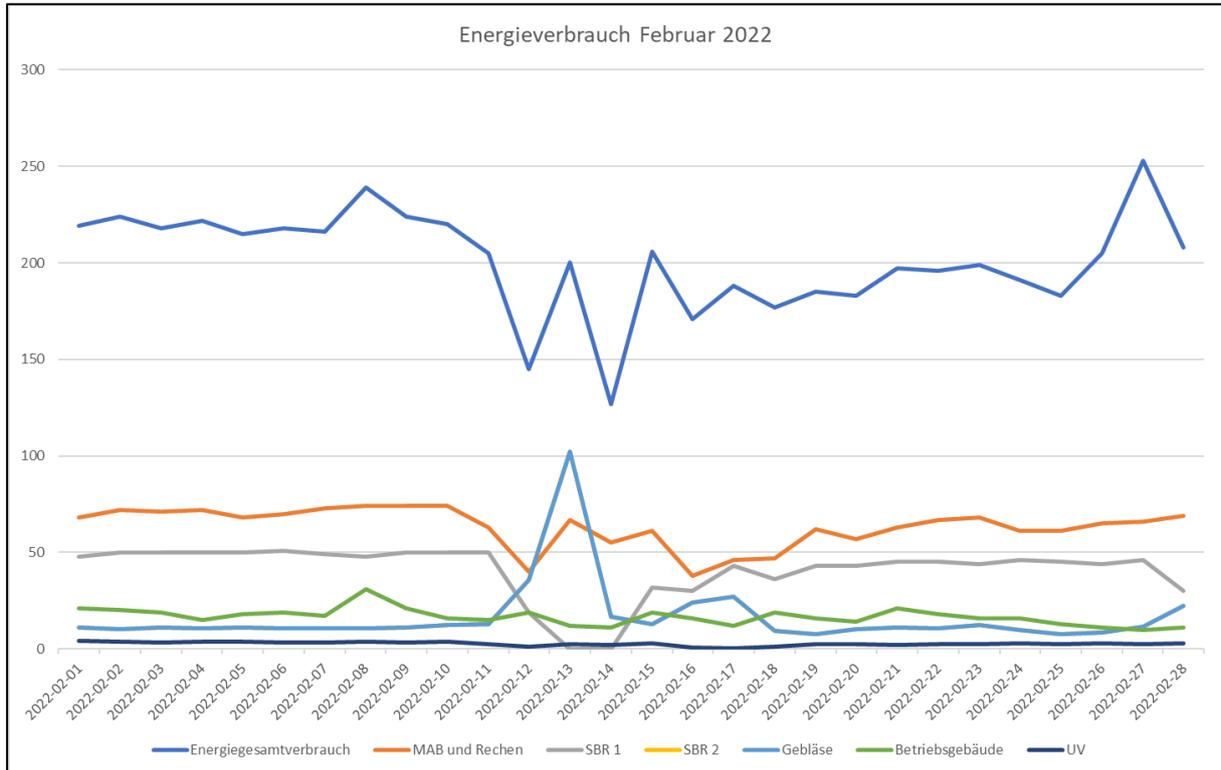


Abbildung 37: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Februar 2022

Tabelle 12: Energieverbrauchserfassung Februar 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	38	74	63	1.772
SBR 1	0	51	41	1.137
SBR 2	0	49	40	1.109
Gebläsestation	8	102	17	462
Betriebsgebäude/SBR-Halle	10	31	17	466
UV-Anlage	0	4	3	75
Sonstige	13	83	24	613
Gesamtanlage (Σ)	69	394	181	5.634

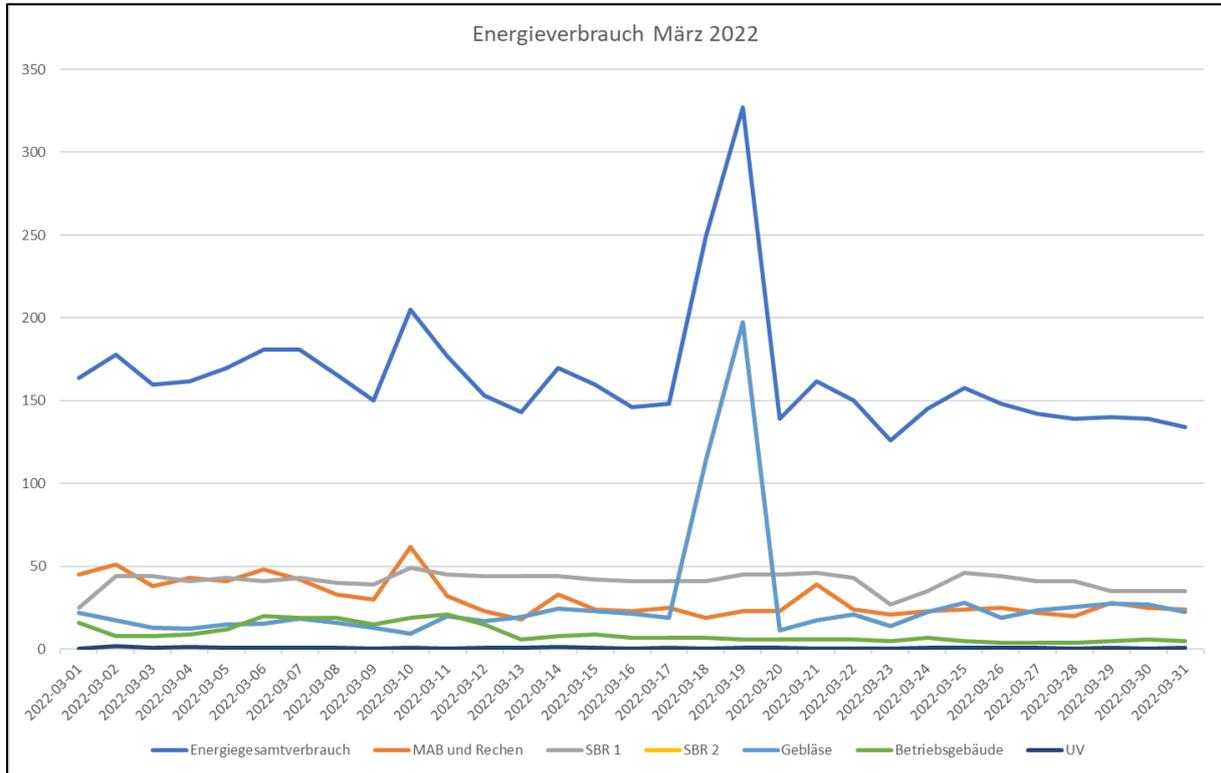


Abbildung 38: Onlineenergiedaten KA Heringhausen März 2022

Tabelle 13: Energieverbrauchserfassung März 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	18	62	31	951
SBR 1	25	49	41	1.269
SBR 2	30	43	39	1.199
Gebläsestation	10	197	28	868
Betriebsgebäude/SBR-Halle	4	21	9	294
UV-Anlage	0	2	1	25
Sonstige	13	22	17	506
Gesamtanlage (Σ)	100	396	166	5.112

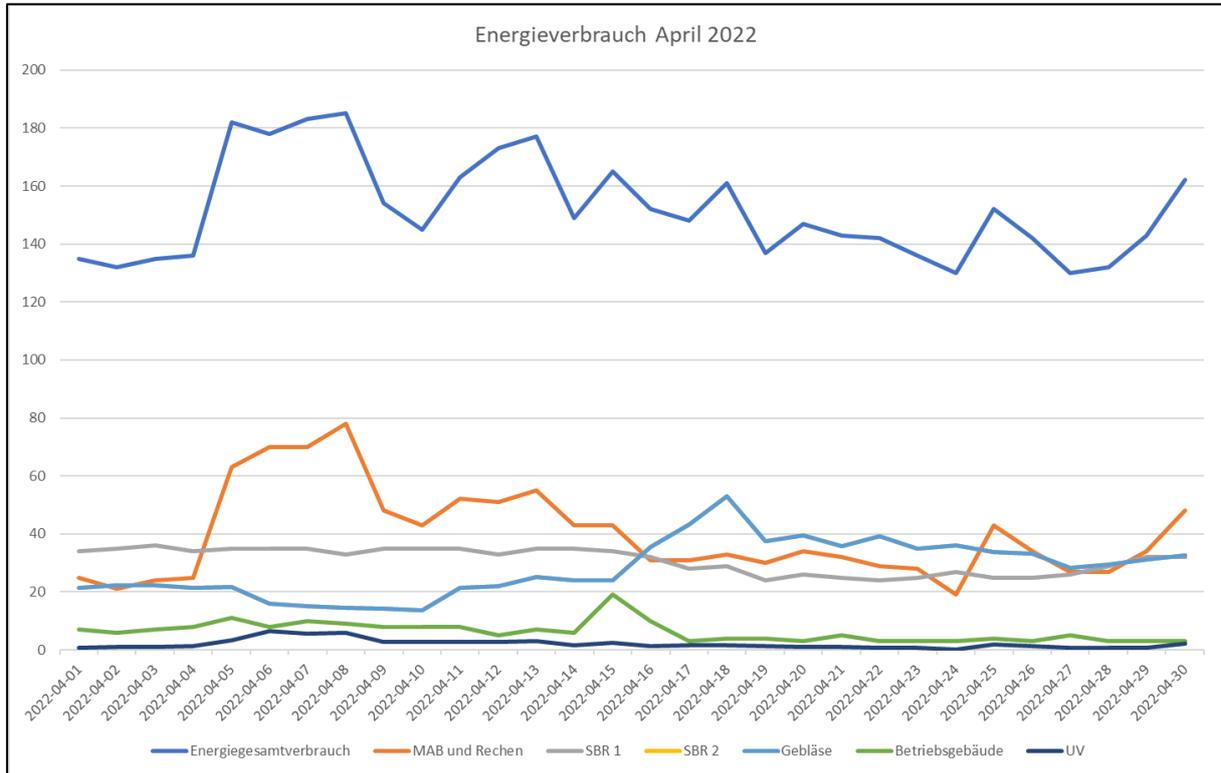


Abbildung 39: Onlineenergiedaten KA Heringhausen April 2022

Tabelle 14: Energieverbrauchserfassung April 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	19	78	40	1.191
SBR 1	24	36	31	928
SBR 2	25	33	28	854
Gebläsestation	14	53	28	842
Betriebsgebäude/SBR-Halle	3	19	6	186
UV-Anlage	0	7	2	60
Sonstige	13	32	16	488
Gesamtanlage (Σ)	98	258	151	4.549

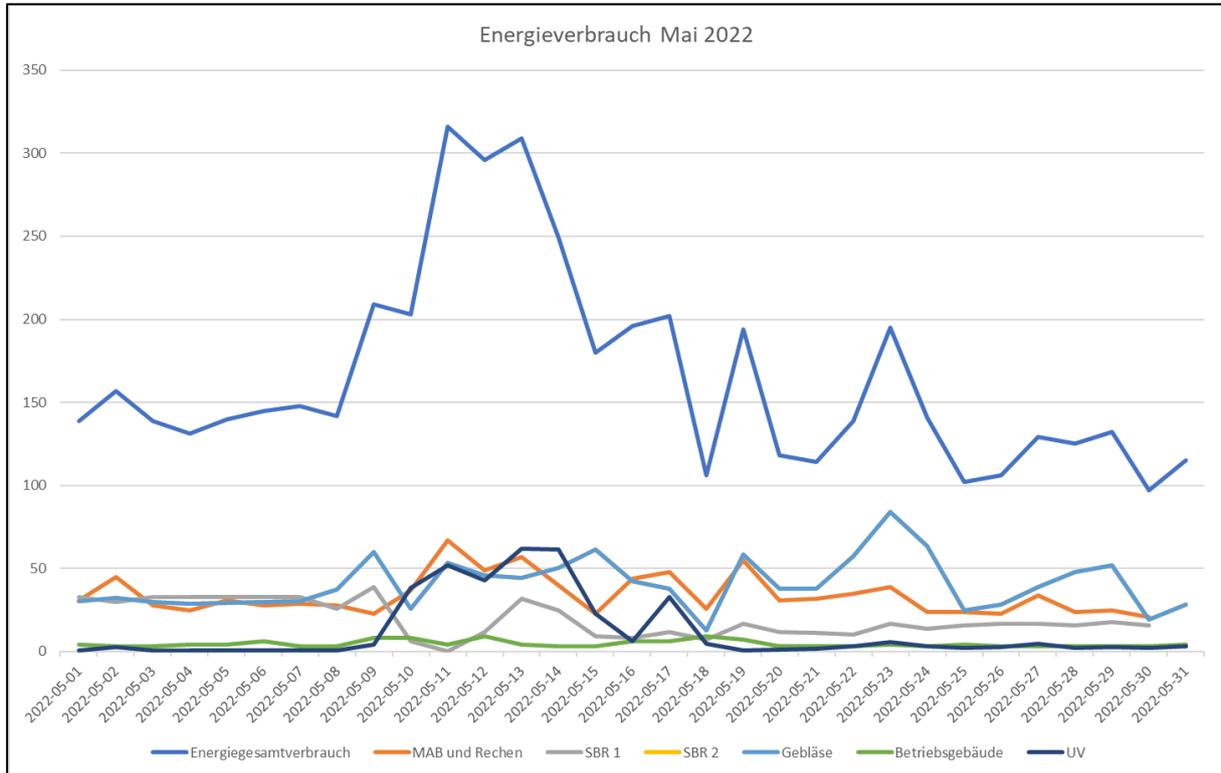


Abbildung 40: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Mai 2022

Tabelle 15: Energieverbrauchserfassung Mai 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	21	67	34	1.053
SBR 1	0	39	16	603
SBR 2	2	41	20	630
Gebläsestation	13	84	41	1.262
Betriebsgebäude/SBR-Halle	3	9	4	136
UV-Anlage	1	62	12	371
Sonstige	13	137	34	1.059
Gesamtanlage (Σ)	53	439	161	5.114

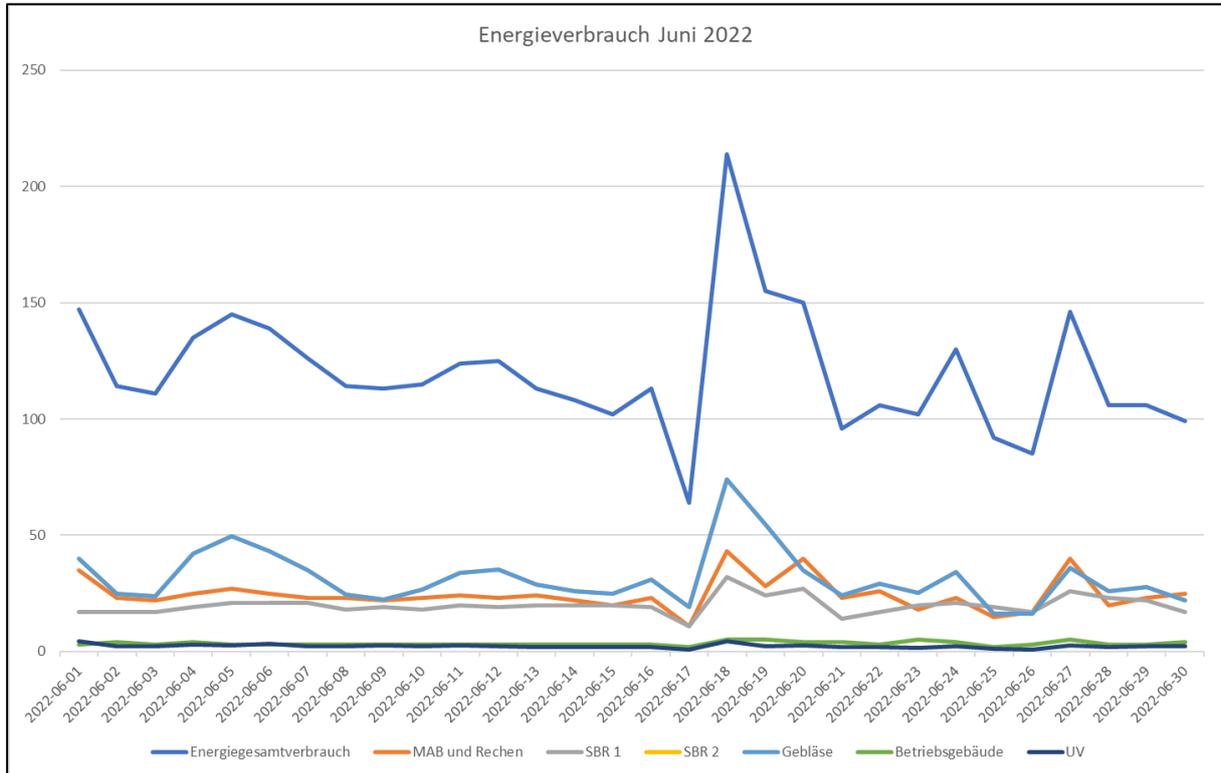


Abbildung 41: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Juni 2022

Tabelle 16: Energieverbrauchserfassung Juni 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	11	43	25	736
SBR 1	11	32	20	596
SBR 2	9	26	20	586
Gebläsestation	16	74	32	951
Betriebsgebäude/SBR-Halle	2	5	3	102
UV-Anlage	1	4	2	69
Sonstige	8	36	18	554
Gesamtanlage (Σ)	58	220	120	3.594

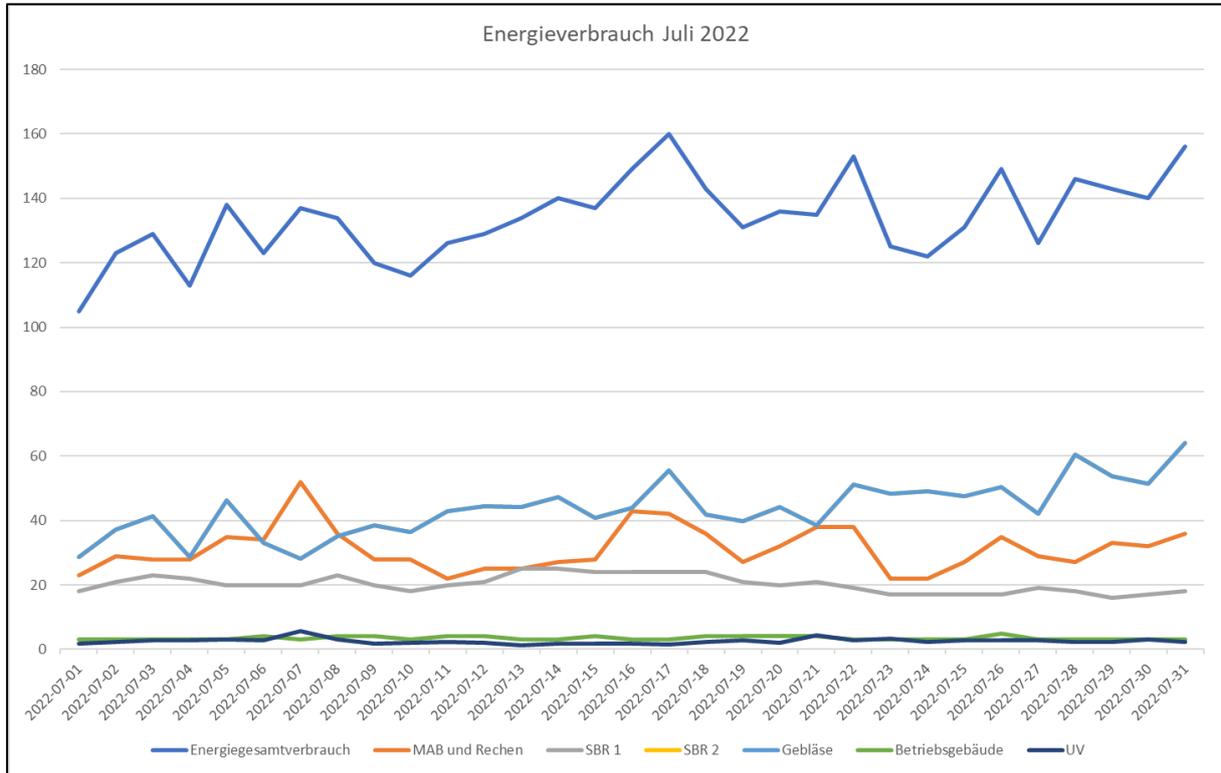


Abbildung 42: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Juli 2022

Tabelle 17: Energieverbrauchserfassung Juli 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	22	52	31	967
SBR 1	16	25	20	629
SBR 2	12	21	16	507
Gebläsestation	28	64	44	1.355
Betriebsgebäude/SBR-Halle	3	5	3	105
UV-Anlage	1	6	3	80
Sonstige	13	26	17	506
Gesamtanlage (Σ)	95	199	134	4.149

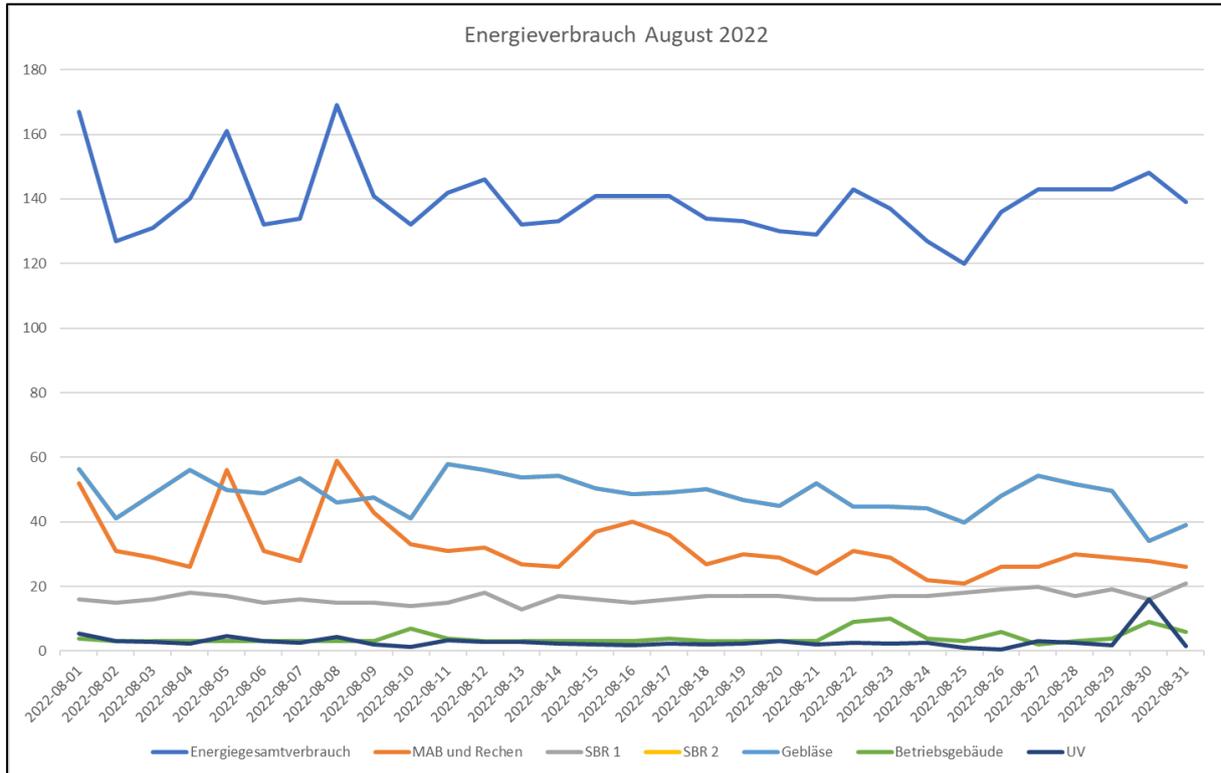


Abbildung 43: Onlineenergiedaten KA Heringhausen August 2022

Tabelle 18: Energieverbrauchserfassung August 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	21	59	32	995
SBR 1	13	21	17	514
SBR 2	13	25	18	543
Gebläsestation	34	58	48	1.503
Betriebsgebäude/SBR-Halle	2	10	4	126
UV-Anlage	1	16	3	93
Sonstige	13	38	17	542
Gesamtanlage (Σ)	97	227	139	4.316

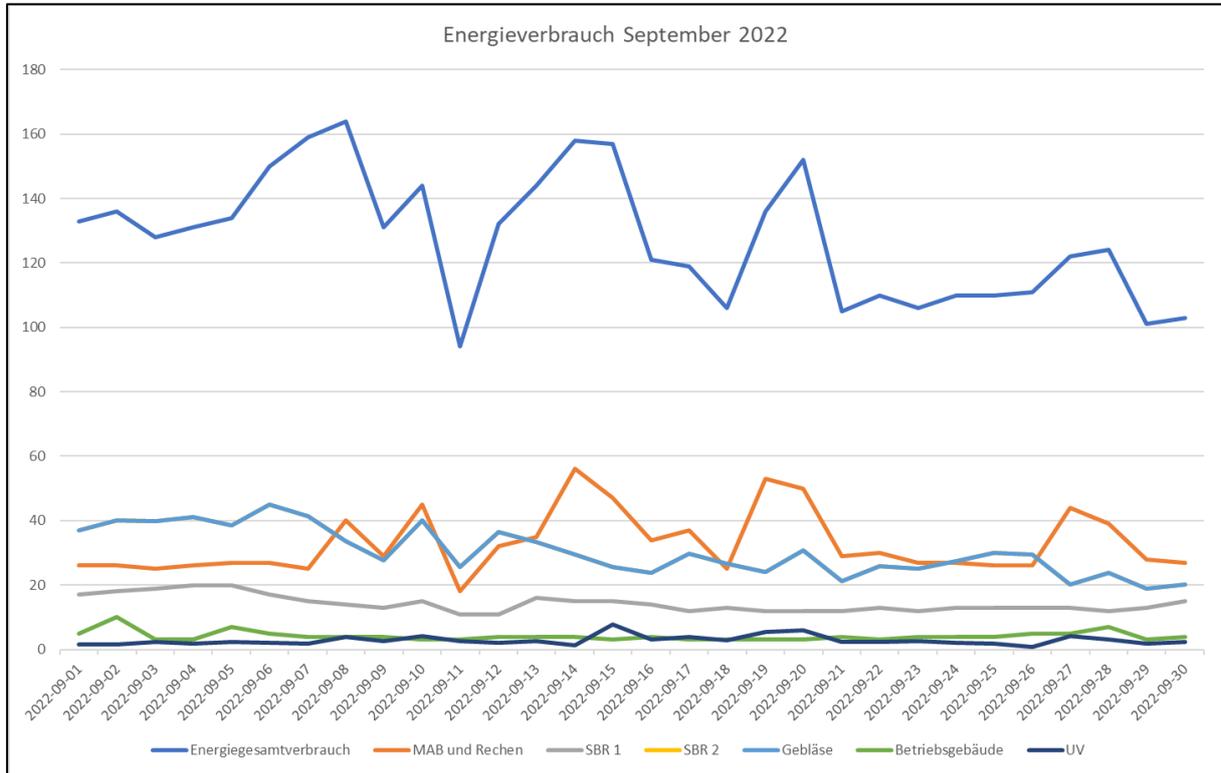


Abbildung 44: Onlineenergiedaten KA Heringhausen September 2022

Tabelle 19: Energieverbrauchserfassung September 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	18	56	33	986
SBR 1	11	20	14	428
SBR 2	18	24	20	602
Gebläsestation	19	45	30	912
Betriebsgebäude/SBR-Halle	3	10	4	125
UV-Anlage	1	8	3	85
Sonstige	14	53	24	695
Gesamtanlage (Σ)	84	216	128	3.833

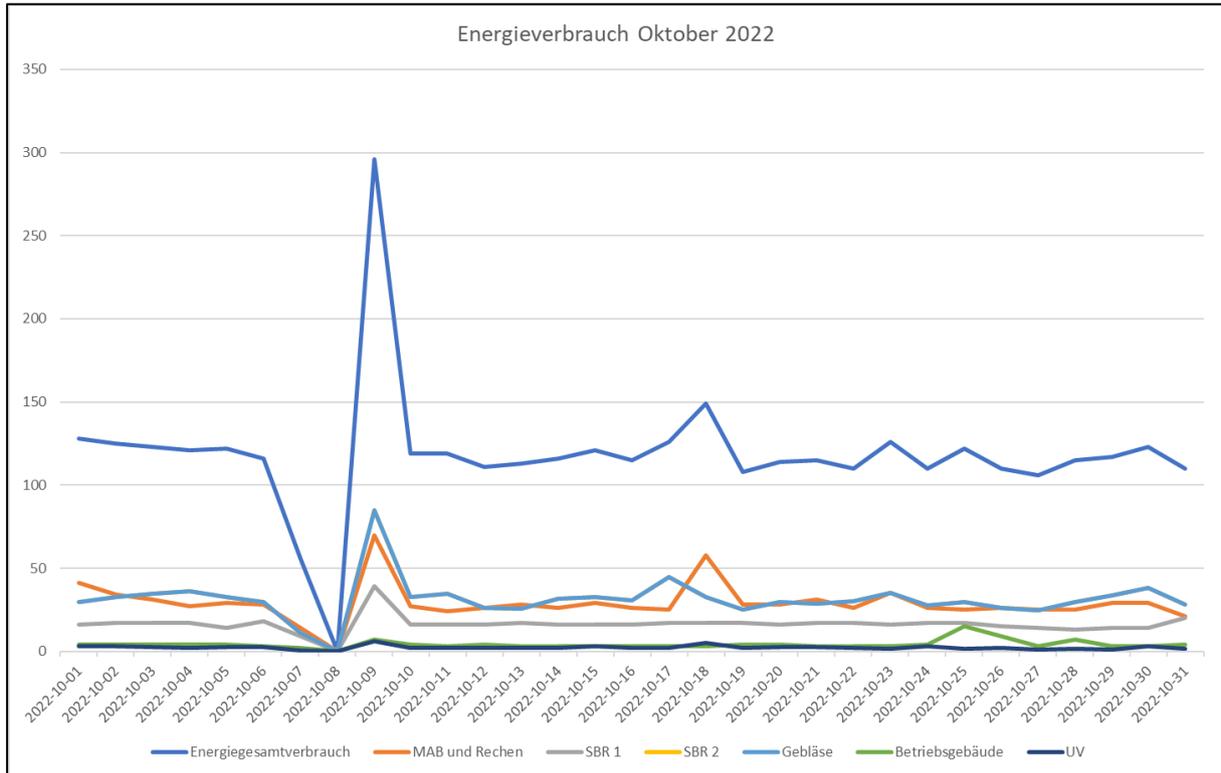


Abbildung 45: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Oktober 2022

Tabelle 20: Energieverbrauchserfassung Oktober 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	0	70	29	897
SBR 1	0	39	16	501
SBR 2	0	51	20	609
Gebläsestation	0	85	31	971
Betriebsgebäude/SBR-Halle	0	15	4	126
UV-Anlage	0	6	2	72
Sonstige	0	41	15	485
Gesamtanlage (Σ)	0	307	117	3.661

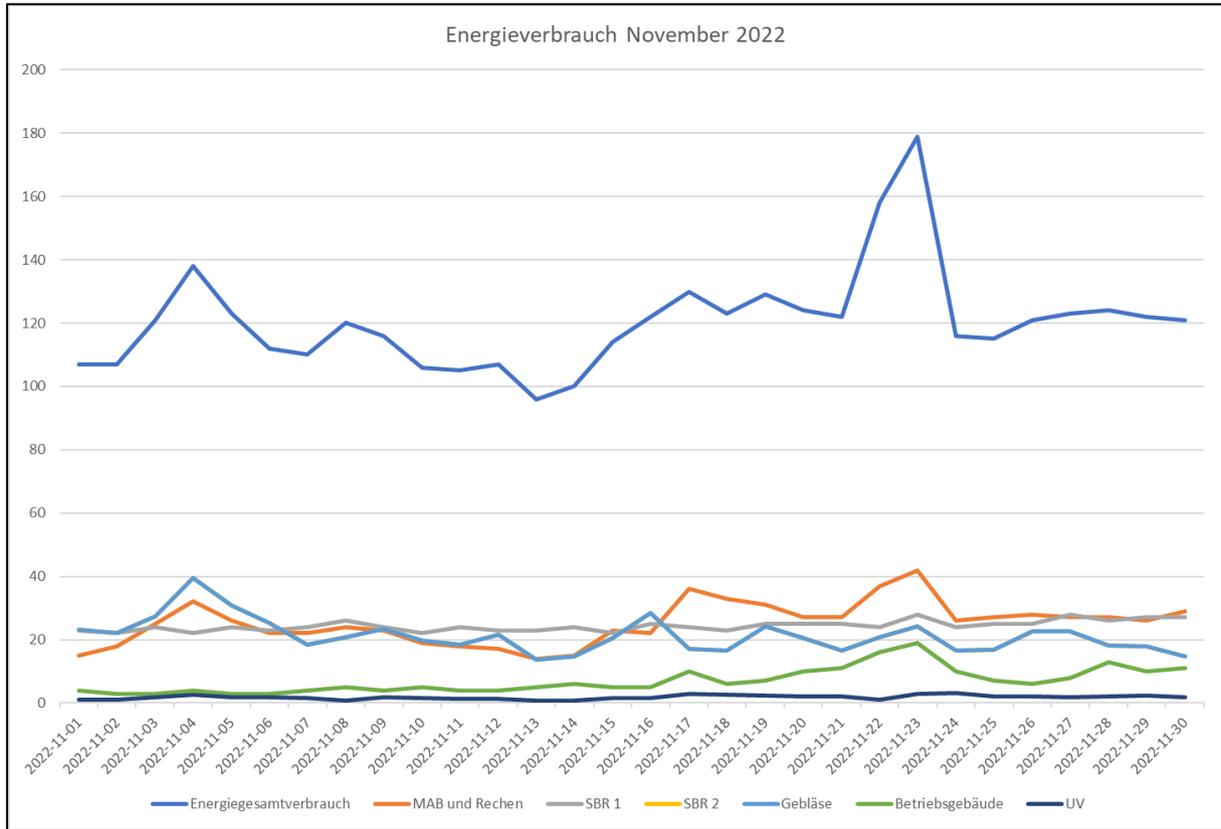


Abbildung 46: Onlineenergiedaten KA Heringhausen November 2022

Tabelle 21: Energieverbrauchserfassung November 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	14	42	25	758
SBR 1	22	28	24	731
SBR 2	21	28	24	714
Gebläsestation	14	40	21	638
Betriebsgebäude/SBR-Halle	3	19	7	211
UV-Anlage	1	3	2	55
Sonstige	14	41	17	504
Gesamtanlage (Σ)	89	201	120	3.611

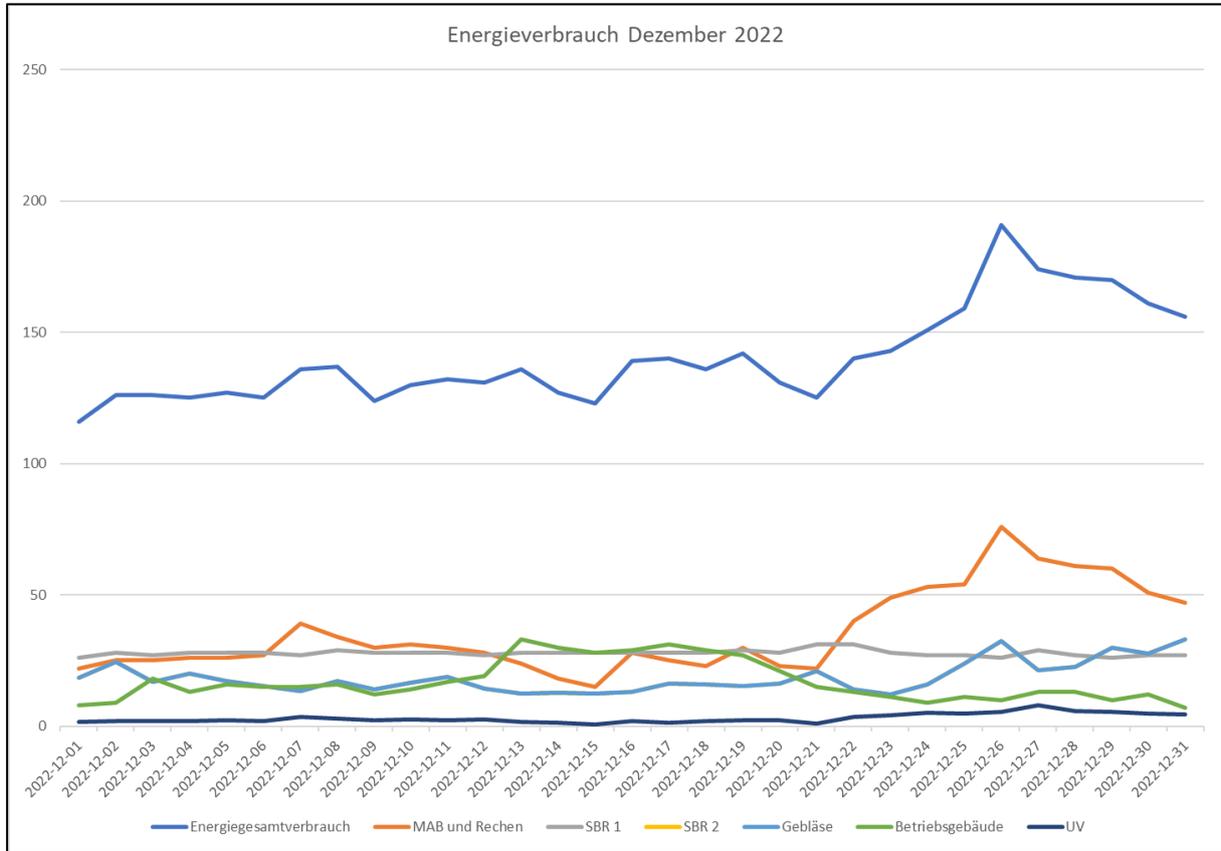


Abbildung 47: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Dezember 2022

Tabelle 22: Energieverbrauchserfassung Dezember 2022 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	15	76	36	1.106
SBR 1	26	31	28	863
SBR 2	19	27	23	705
Gebläsestation	12	33	19	574
Betriebsgebäude/SBR-Halle	7	33	17	524
UV-Anlage	1	8	3	93
Sonstige	13	20	15	485
Gesamtanlage (Σ)	93	228	141	4.350

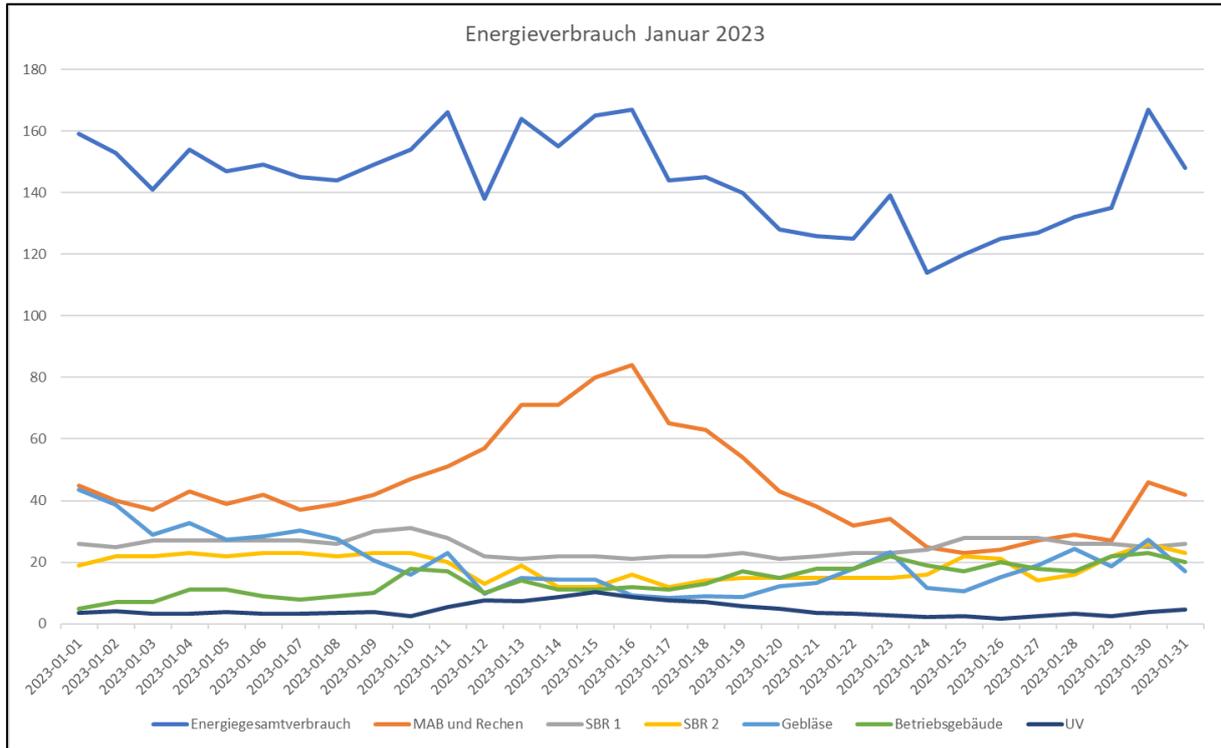


Abbildung 48: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Januar 2023

Tabelle 23: Energieverbrauchserfassung Januar 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	23	84	45	1.397
SBR 1	21	31	25	776
SBR 2	12	26	19	575
Gebläsestation	8	44	20	617
Betriebsgebäude/SBR-Halle	5	23	14	440
UV-Anlage	2	10	5	140
Gesamtanlage (Σ)	71	218	128	3.945

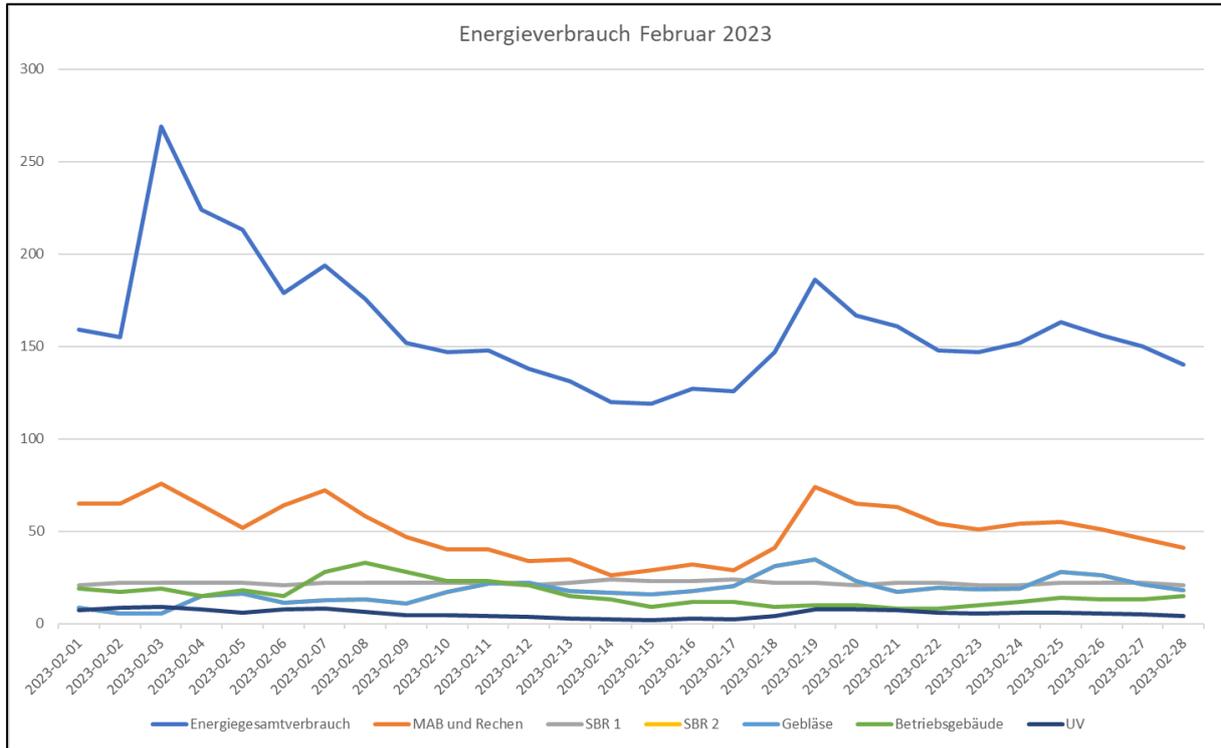


Abbildung 49: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Februar 2023

Tabelle 24: Energieverbrauchserfassung Februar 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	26	76	51	1.423
SBR 1	21	24	22	615
SBR 2	21	23	22	624
Gebläsestation	5	35	18	505
Betriebsgebäude/SBR-Halle	8	33	16	442
UV-Anlage	2	9	6	156
Gesamtanlage (Σ)	83	200	135	3.765

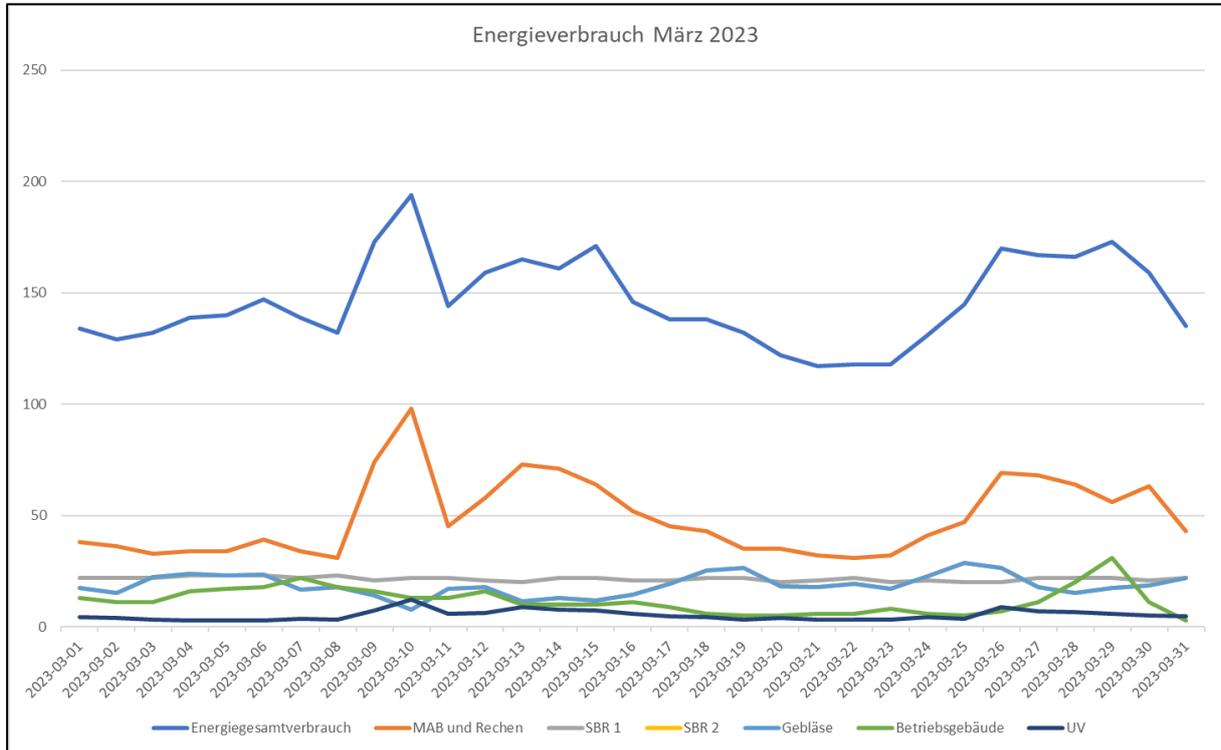


Abbildung 50: Onlineenergiedaten KA Heringhausen März 2023

Tabelle 25: Energieverbrauchserfassung März 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	31	98	49	1.518
SBR 1	20	23	22	669
SBR 2	21	24	23	701
Gebläsestation	8	29	19	579
Betriebsgebäude/SBR-Halle	3	31	12	364
UV-Anlage	3	12	5	161
Gesamtanlage (Σ)	86	217	130	3.992

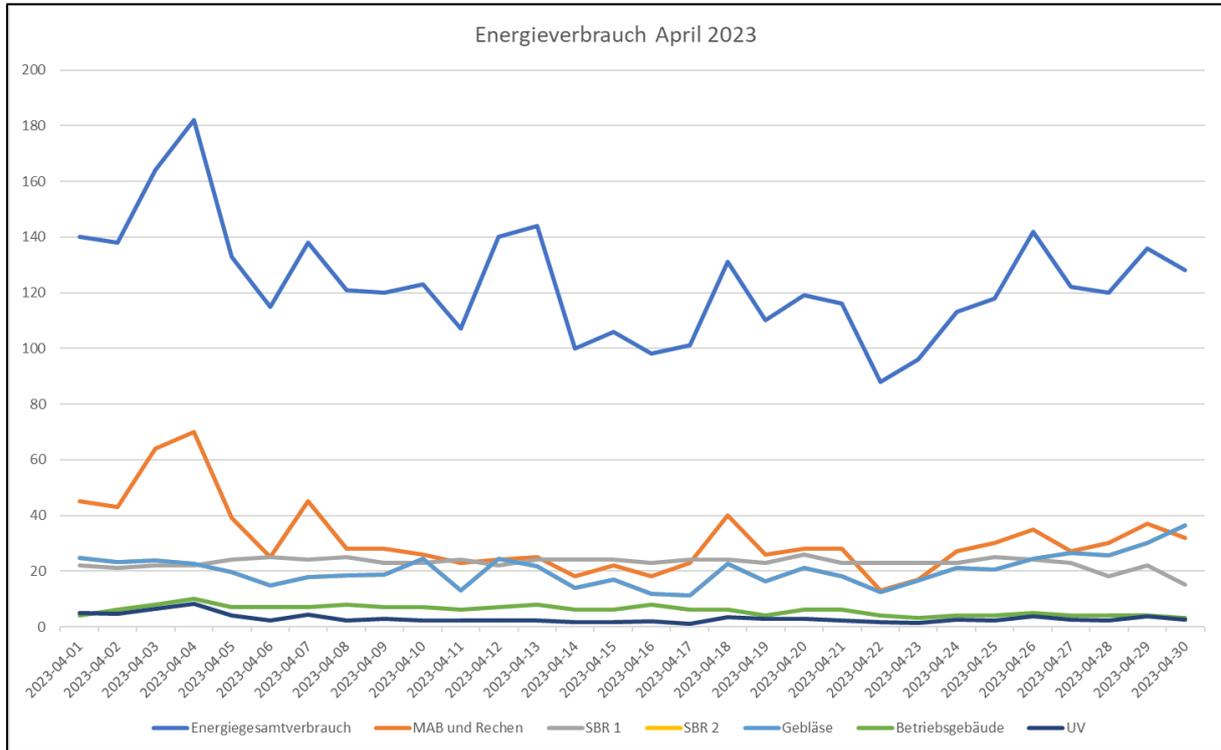


Abbildung 51: Onlineenergiedaten KA Heringhausen April 2023

Tabelle 26: Energieverbrauchserfassung April 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	13	70	31	936
SBR 1	15	26	23	688
SBR 2	19	24	22	650
Gebläsestation	11	36	20	612
Betriebsgebäude/SBR-Halle	3	10	6	175
UV-Anlage	1	8	3	87
Gesamtanlage (Σ)	62	174	105	3.148

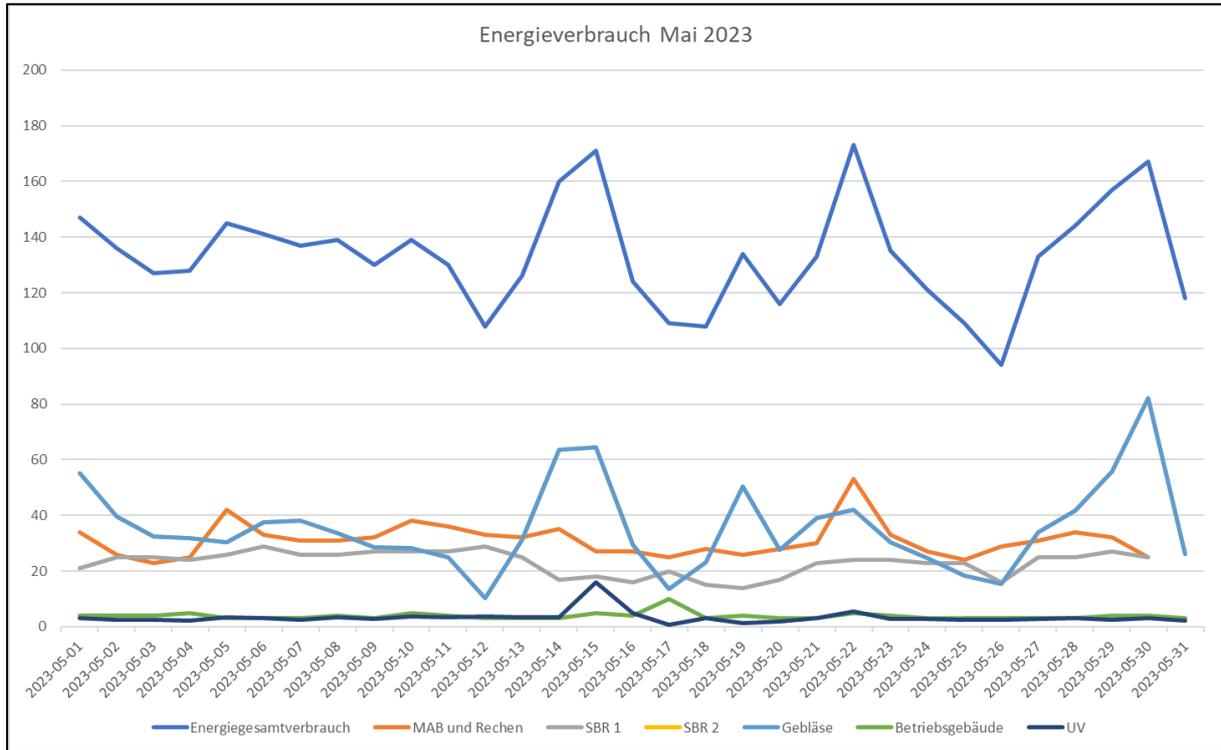


Abbildung 52: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Mai 2023

Tabelle 27: Energieverbrauchserfassung Mai 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	22	53	31	952
SBR 1	14	29	23	715
SBR 2	13	28	22	669
Gebläsestation	10	82	36	1.105
Betriebsgebäude/SBR-Halle	3	10	4	118
UV-Anlage	1	16	3	104
Gesamtanlage (Σ)	63	218	119	3.663

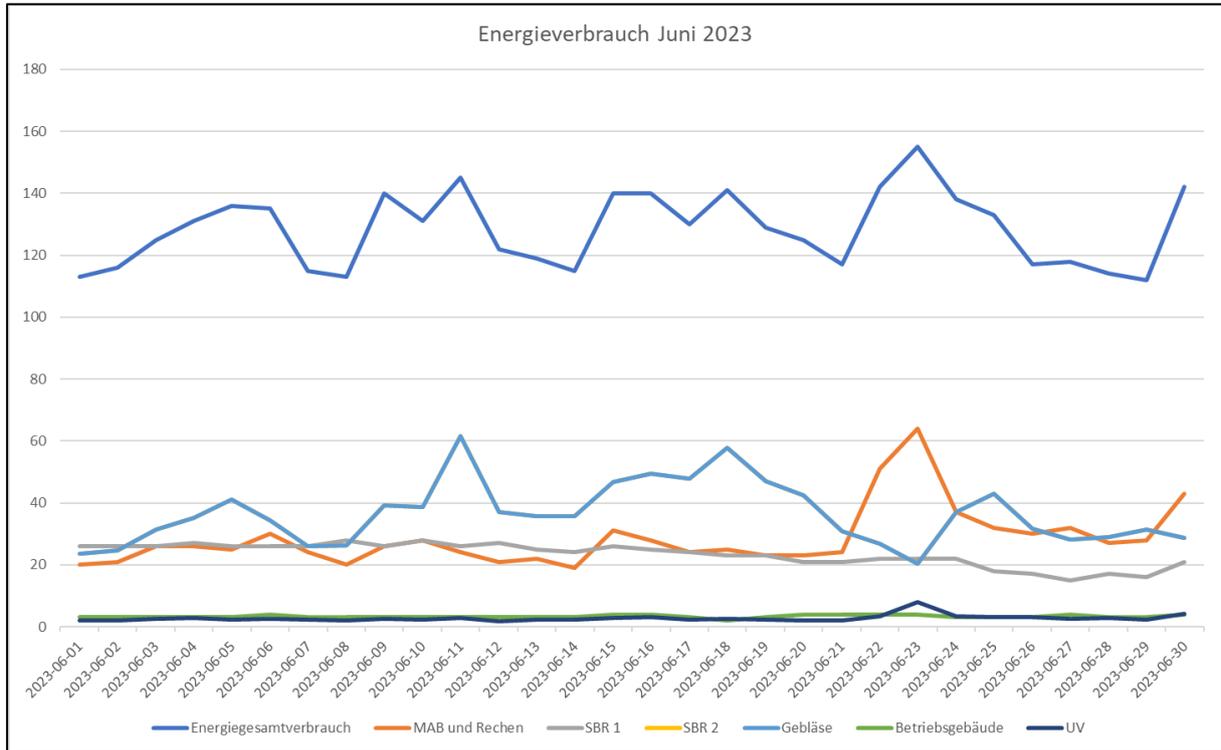


Abbildung 53: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Juni 2023

Tabelle 28: Energieverbrauchserfassung Juni 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	19	64	28	854
SBR 1	15	28	23	700
SBR 2	12	24	18	535
Gebläsestation	20	62	36	1.090
Betriebsgebäude/SBR-Halle	2	4	3	98
UV-Anlage	2	8	3	83
Gesamtanlage (Σ)	70	190	111	3.360

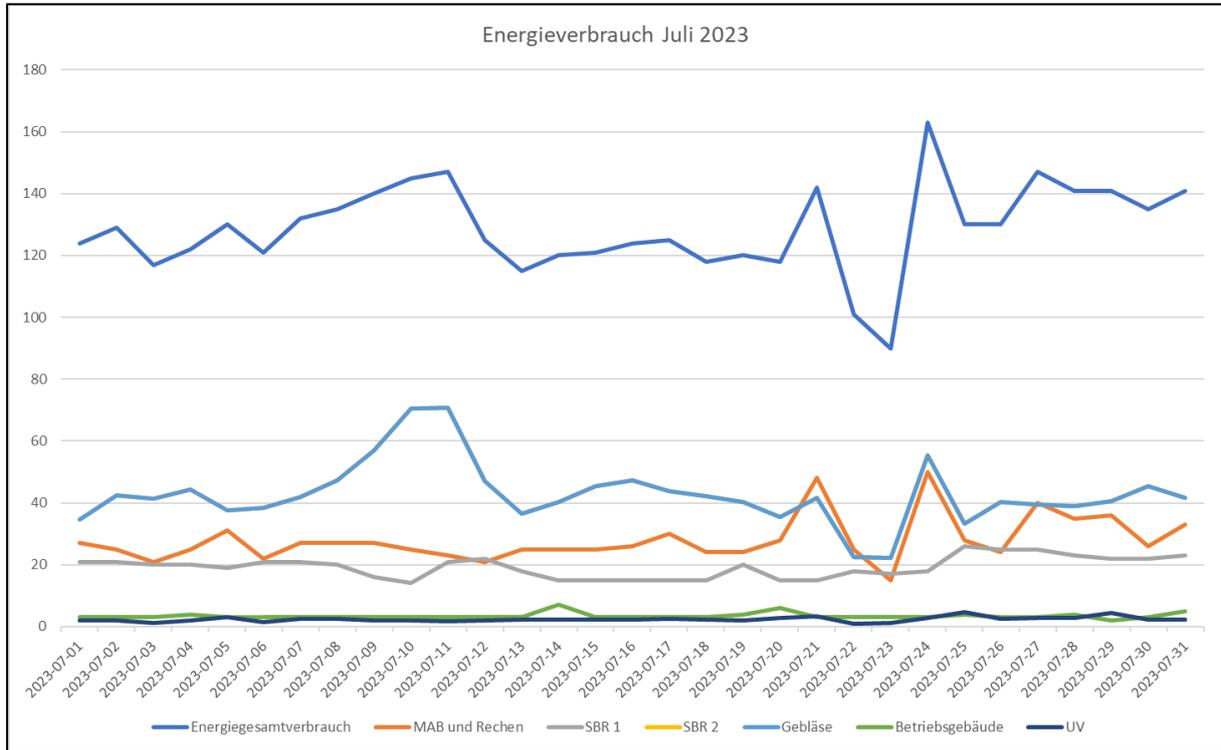


Abbildung 54: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Juli 2023

Tabelle 29: Energieverbrauchserfassung Juli 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	15	50	28	868
SBR 1	14	26	19	598
SBR 2	12	22	17	531
Gebläsestation	22	71	43	1.325
Betriebsgebäude/SBR-Halle	2	7	3	105
UV-Anlage	1	5	2	73
Gesamtanlage (Σ)	66	181	112	3.500

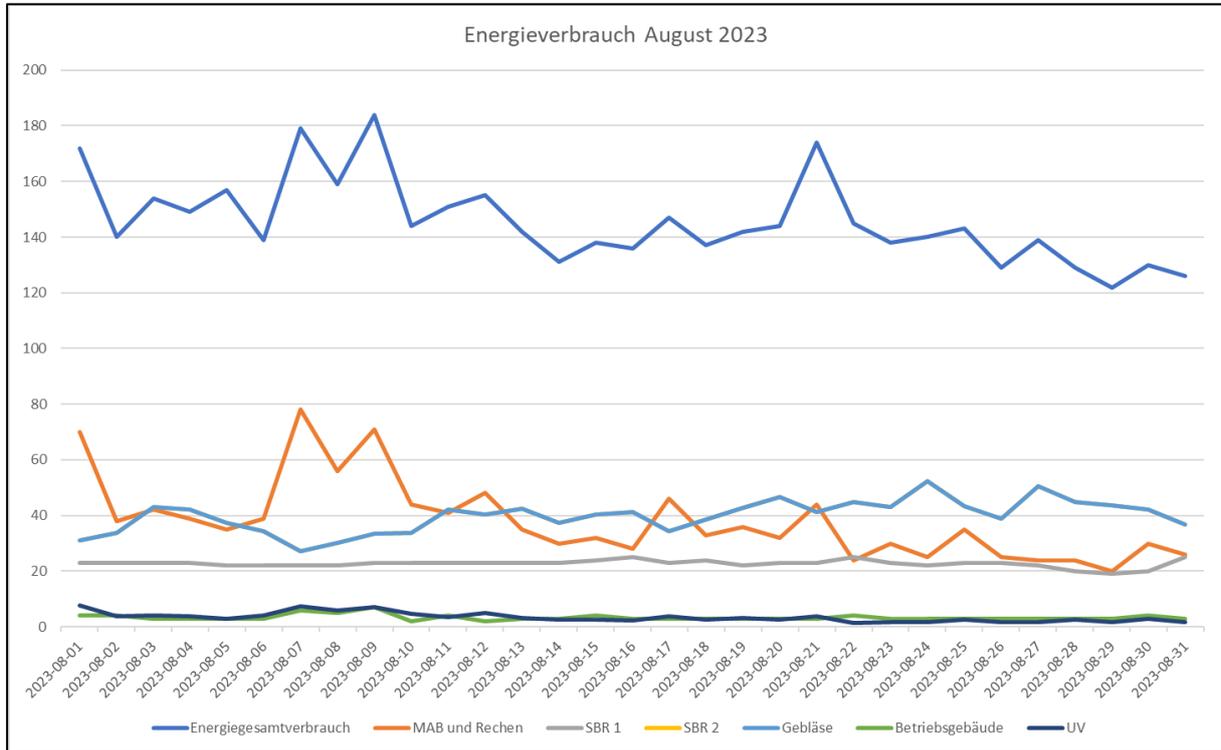


Abbildung 55: Onlineenergiedaten KA Heringhausen August 2023

Tabelle 30: Energieverbrauchserfassung August 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	20	78	38	1.180
SBR 1	19	25	23	704
SBR 2	15	23	21	644
Gebläsestation	27	52	40	1.235
Betriebsgebäude/SBR-Halle	2	7	3	106
UV-Anlage	2	8	3	106
Gesamtanlage (Σ)	85	193	128	3.975

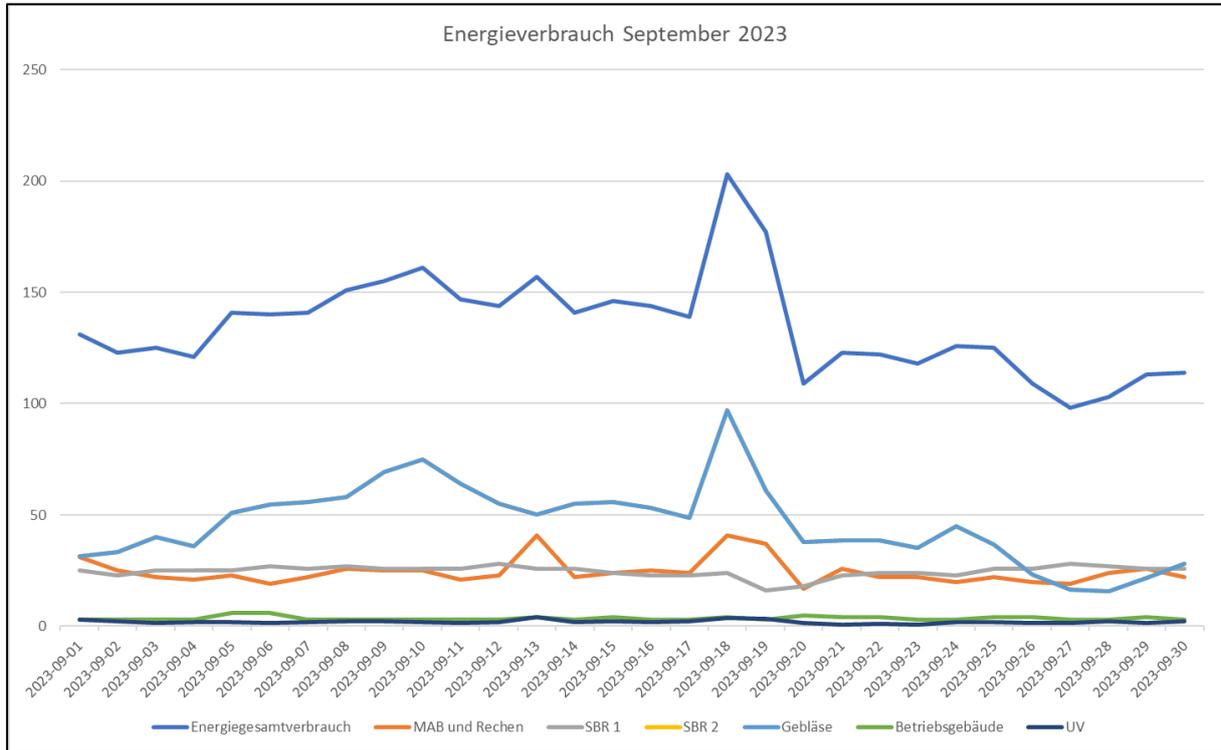


Abbildung 56: Onlineenergiedaten KA Heringhausen September 2023

Tabelle 31: Energieverbrauchserfassung September 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	17	41	25	737
SBR 1	16	28	25	742
SBR 2	15	22	18	528
Gebläsestation	16	97	46	1.382
Betriebsgebäude/SBR-Halle	3	6	4	106
UV-Anlage	1	4	2	58
Gesamtanlage (Σ)	68	198	120	3.553

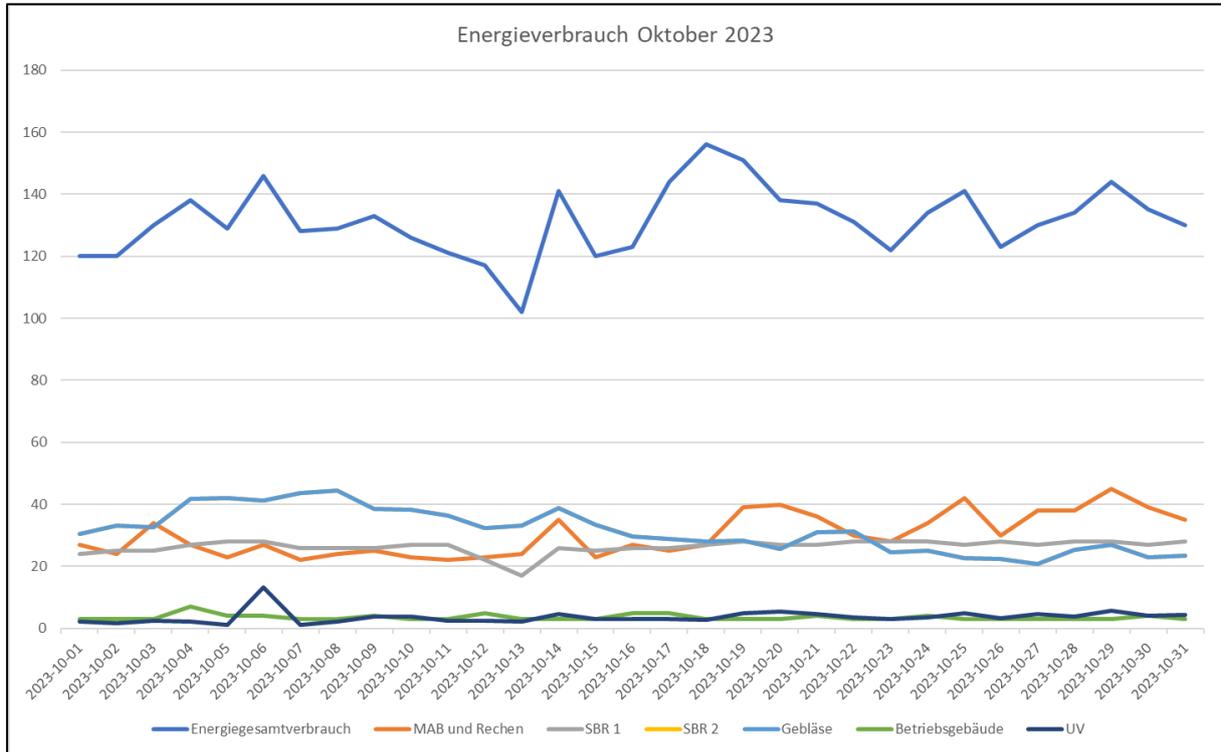


Abbildung 57: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Oktober 2023

Tabelle 32: Energieverbrauchserfassung Oktober 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	22	45	30	936
SBR 1	17	28	26	817
SBR 2	10	21	18	554
Gebläsestation	21	45	32	977
Betriebsgebäude/SBR-Halle	3	7	4	109
UV-Anlage	1	13	4	109
Gesamtanlage (Σ)	74	159	114	3.502

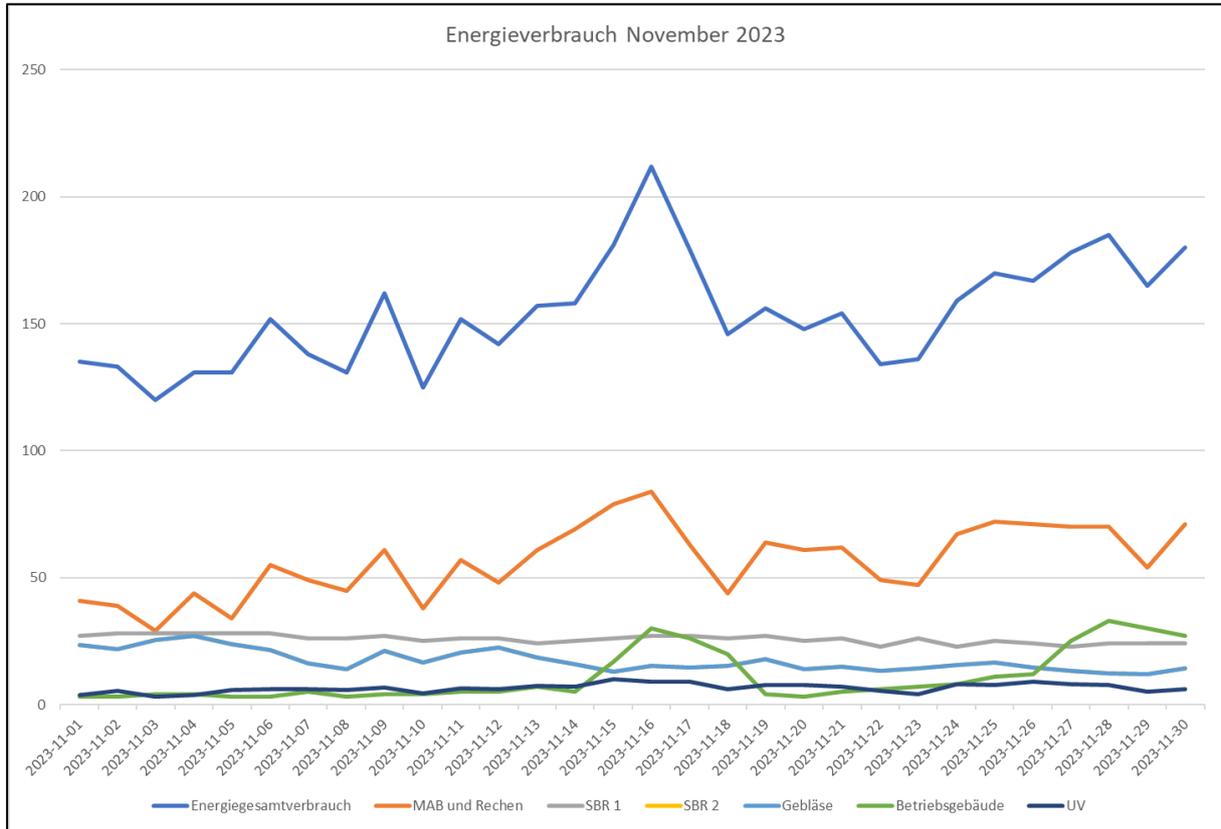


Abbildung 58: Onlineenergiedaten KA Heringhausen November 2023

Tabelle 33: Energieverbrauchserfassung November 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	29	84	57	1.698
SBR 1	23	28	26	772
SBR 2	9	24	21	621
Gebläsestation	12	27	17	521
Betriebsgebäude/SBR-Halle	3	33	11	322
UV-Anlage	3	10	7	196
Gesamtanlage (Σ)	79	206	139	4.130

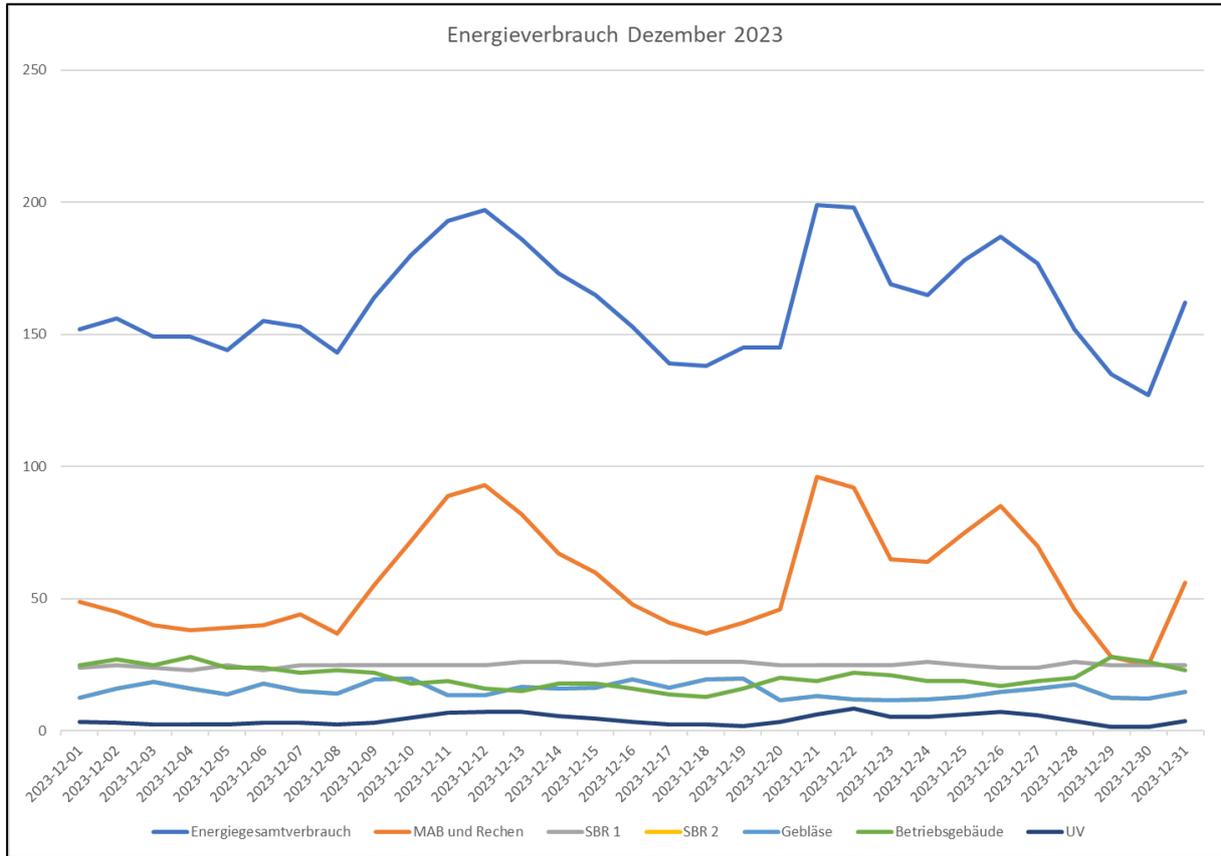


Abbildung 59: Onlineenergiedaten KA Heringhausen Dezember 2023

Tabelle 34: Energieverbrauchserfassung Dezember 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Aggregate- und Funktionsbereich	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
MAB + Rechen	25	96	57	1.765
SBR 1	23	26	25	775
SBR 2	22	26	24	746
Gebläsestation	12	20	15	477
Betriebsgebäude/SBR-Halle	13	28	21	636
UV-Anlage	2	9	4	133
Gesamtanlage (Σ)	97	205	146	4.532

5.2.2.2.3. Analyse

Während der Hauptverbraucher Gebläsestation in beiden Jahren nahezu identische Energieverbräuche aufweist, zeigen sich bei beiden SBR-Reaktoren sichtbare Unterschiede zwischen 2022 und 2023 (siehe Kapitel 5.2.2.2.1). Weiterhin fällt auf, dass der Energieverbrauch im Aggregate-/Funktionsbereich MAB und Rechen höher ausfällt als bei der Gebläsestation, was für Kläranlagen der Größenordnung < 10.000 EW eher ungewöhnlich ist. Die Analyse hat zwei wesentliche Gründe gezeigt. Einerseits dient das Misch- und Ausgleichsbecken neben der Funktion als Zulaufpuffer auch als Zulaufhebwerk. Die Distanz als auch die geodätische und manometrische Höhe zu den beiden SBR-Becken ist wesentlich größer als üblicherweise bei SBR-Anlagen, das ist ein Grund für den erhöhten Energieverbrauch für diesen Aggregate-/Funktionsbereich. Hinzu kommt, dass sich die Zulaufschwankungen im MAB am stärksten zeigen (auch im Stromverbrauch), da alle Aggregate nach dem Schwankungsausgleich im MAB gleichmäßig beschickt werden. Andererseits zeigen die Analysen zum Energieverbrauch der Gebläse, dass diese insgesamt weitaus geringer ausfallen als ebenfalls bei SBR-Anlagen üblich, so dass sich die Energieverbrauchsanteile der beiden Aggregate-/Funktionsbereiche Misch- und Ausgleichsbecken und Gebläse stark verschieben. Als Mittelwert der ausgewerteten Jahre 2022 und 2023 ergibt sich ein Jahresenergieverbrauch von 52.756 kWh/a. Tabelle 35 zeigt den Vergleich der Energiedatenanalyse 2022 und 2023 mit den planerischen Annahmen gemäß Kapitel 5.2.2.1. Demnach kann mit CBR eine Gesamtreduzierung von rd. 70 % gegenüber einer konventionellen SBR-Systematik und rd. 60 % gegenüber einer innovativen SBR-Systematik erreicht werden.

Tabelle 35: Statistik Energieverbrauchserfassung 2023 relevanter Aggregate- und Funktionsbereiche der KA Heringhausen

Vergleichsenergieverbrauch	Gesamt [kWh/a]	kW/EW
Konventionelle SBR	171.832	
- 1.980 EW (mittlere rechnerische Auslastung)		86,78
- 3.000 EW (maximale rechnerische Auslastung)		57,27
Innovative SBR ohne CBR	129.346	
- 1.980 EW (mittlere rechnerische Auslastung)		53,57
- 3.000 EW (maximale rechnerische Auslastung)		43,12
Innovative SBR mit CBR	52.756	
- 1.980 EW (mittlere rechnerische Auslastung)		26,64
- 3.000 EW (maximale rechnerische Auslastung)		17,59

Um auch zu beurteilen, wie sich der Einsatz des CBR-Bausteins im Verlauf der Monitoringphase ausgewirkt hat, erfolgte eine weitere Analyse der Monatsbetrachtungen gemäß Kapitel 5.2.2.2. Zuerst wurden die üblichen Hauptverbraucher Gebläse betrachtet (siehe Abbildung 60). Hier kann man erkennen, dass der Energiebedarf der Gebläse im Jahr 2023 insbesondere in den Hauptperioden des Tourismus April und August geringer ausfällt als im Vorjahr 2022.

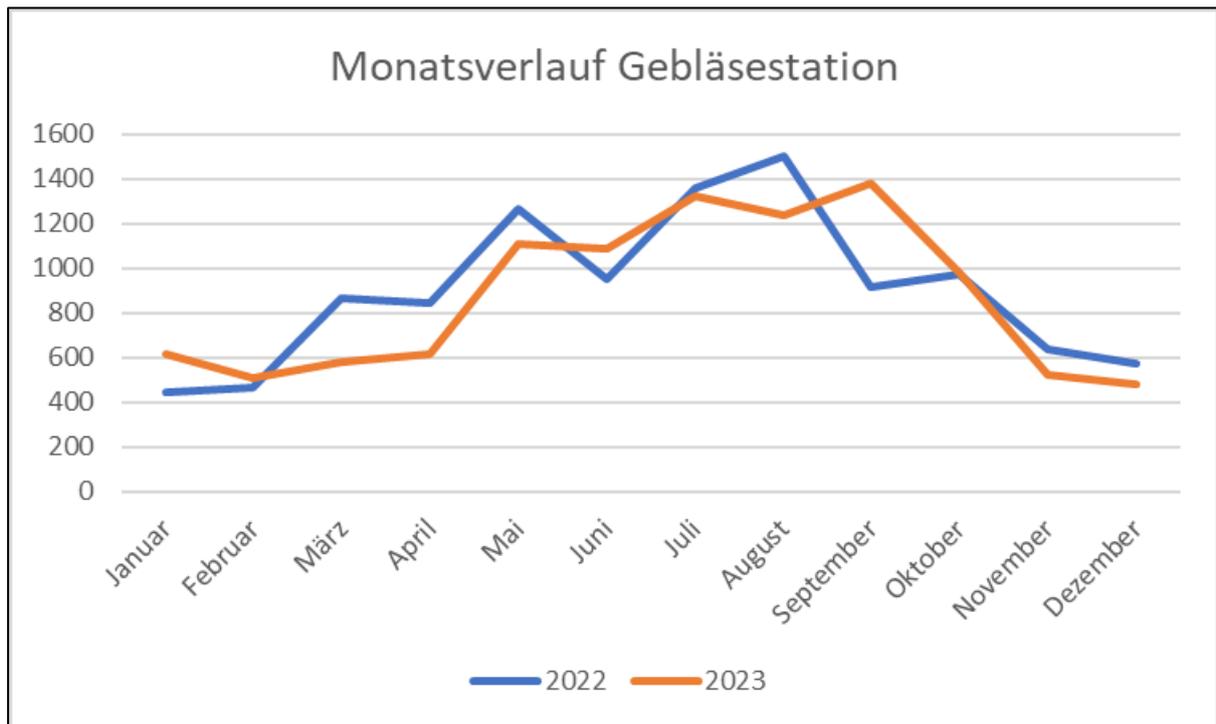


Abbildung 60: Onlineenergiekosten Monatswerte Gebläsestation KA Heringhausen 2022/2023

Im Vergleich dazu zeigt der zweite große Verbraucher eine starke Optimierung ab der zweiten Jahreshälfte 2022. Ab diesem Zeitraum wurden die ersten Erkenntnisse des CBR, wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben, in der Sollwerteingabe beachtet. Während in 2022 noch große Schwankungen feststellbar waren, konnten insbesondere die Rührwerkintervalle besser auf die Zulaufbedingungen angepasst werden und in 2023 einen vergleichsweise konstanten Verlauf im energiesparenden Betriebsbereich ermöglichen.

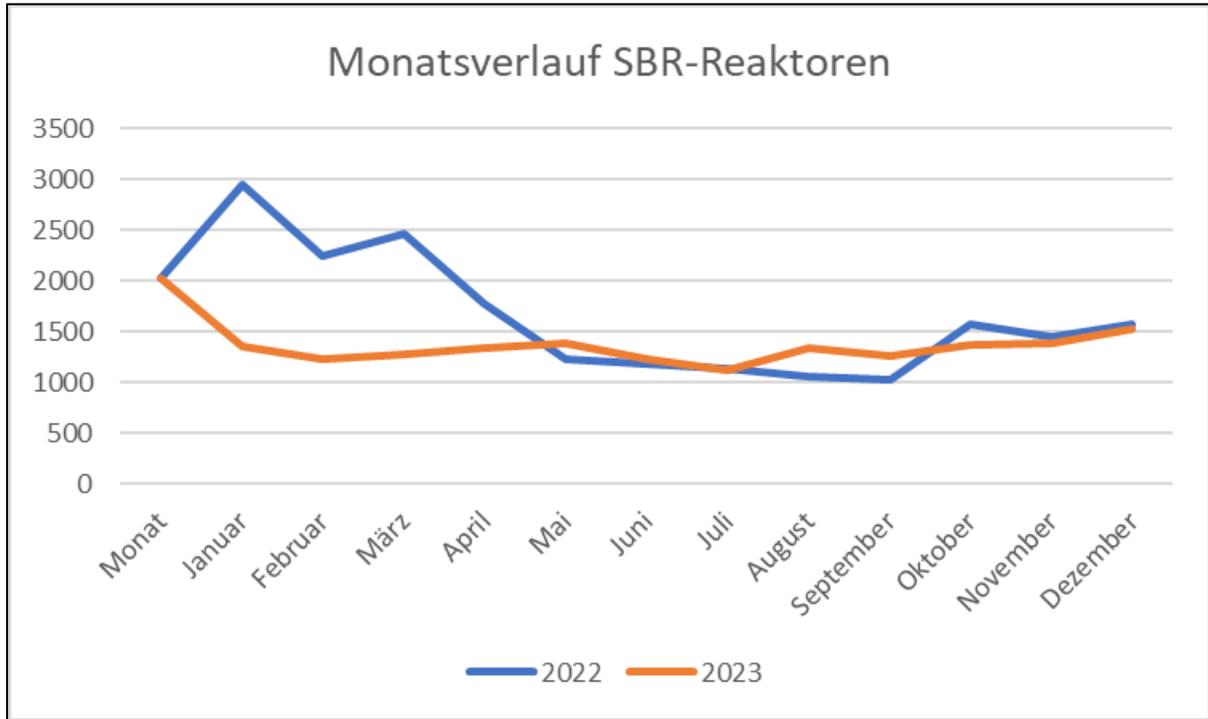


Abbildung 61: Onlineenergiedaten Monatswerte SBR-Reaktoren KA Heringhausen 2022/2023

5.2.2.3. Energiebilanz (nach DWA A 216) für die realisierte Kläranlage Heringhausen

Gemäß Abbildung 29 kann der Zeitraum Mai bis Oktober als repräsentativer Zeitraum für eine vergleichende Energiebilanz nach DWA A 216 angesetzt werden.

Tabelle 36: Energieverbrauchserfassung Mai bis Oktober 2022 und Mai bis Oktober 2023 Gesamtanlage der KA Heringhausen

Gesamtanlage	Min-Wert [kWh/d]	Max-Wert [kWh/d]	Mittel-Wert [kWh/d]	Gesamt-Wert [kWh/m]
Mai 2022	97	316	165	5.114
Juni 2022	64	214	120	3.595
Juli 2022	105	160	134	4.419
August 2022	120	169	139	4.315
September 2022	94	164	128	3.831
Oktober 2022	0	296	118	3.662
Mai 2023	94	173	134	4.139
Juni 2023	112	155	128	3.849
Juli 2023	90	163	129	3.989
August 2023	122	184	146	4.515
September 2023	98	203	135	4.047
Oktober 2023	102	156	131	4.073
Mittelwert	92	196	134	4.129

Hochgerechnet auf 12 Monate beträgt der Verbrauch für die wesentlichen verfahrenstechnischen Stufen 49.548 kWh/a (12 Monate * 4.129 kWh/Monat). Dieser Jahreswert geht in die weiteren Bearbeitungen ein. Abbildung 62 und Abbildung 63 zeigen den Energiecheck gemäß DWA A 216. Demnach zeigen bei 1.980 EW nur 16,7 % der Anlagen aus dem DWA-Benchmark eine bessere Bilanz für den Gesamtenergieverbrauch auf, bei einer Belastung von 3.000 EW sind es sogar nur 3,2 %. Insgesamt kann das beabsichtigte Ziel der weitergehenden Energiereduzierung mit der in Kapitel 4 beschriebenen CBR-Systematik als erreicht beurteilt werden.

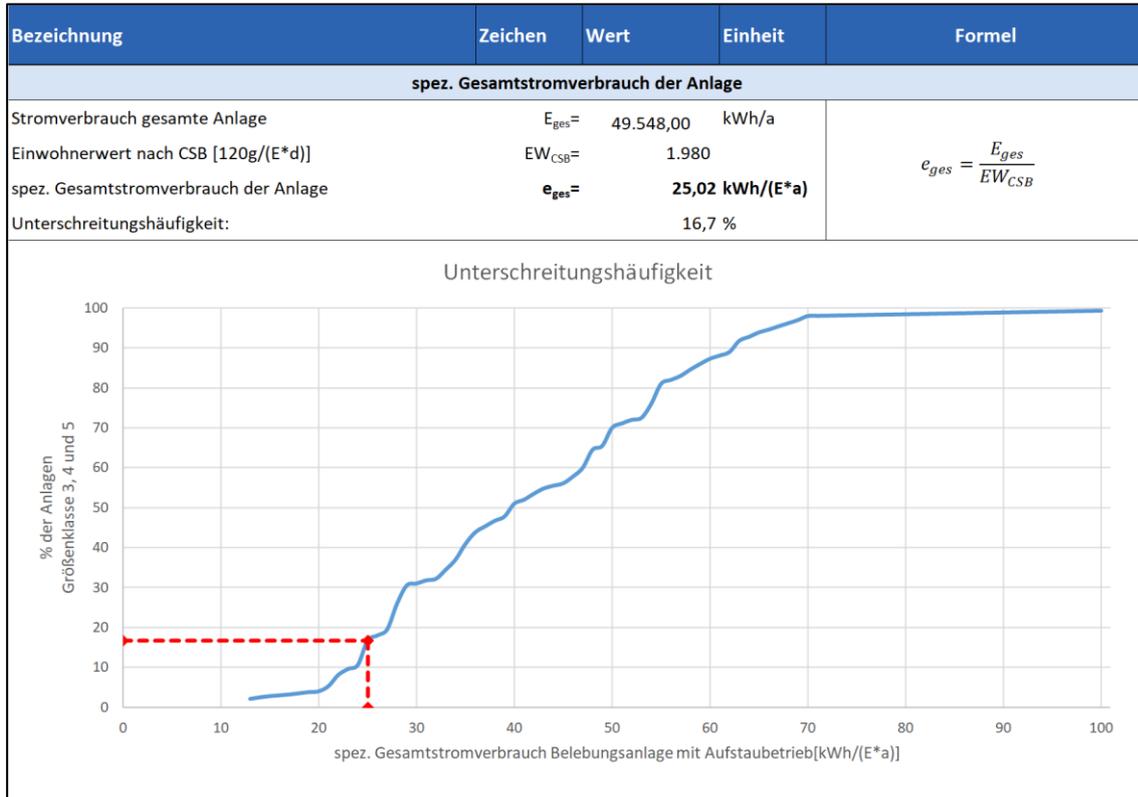


Abbildung 62: Vergleichsanalyse Energieverbrauch 1.980 EW innovative SBR mit CBR-Steuerung gemäß Energiecheck DWA-A 216

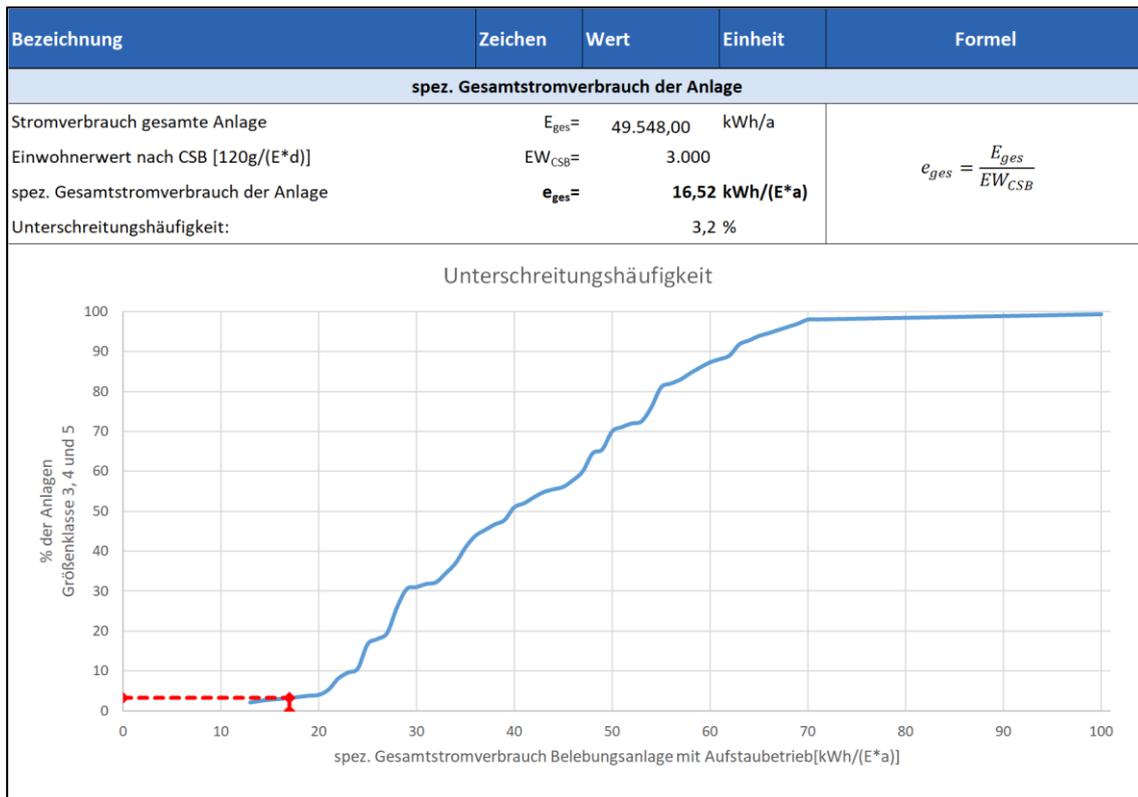


Abbildung 63: Vergleichsanalyse Energieverbrauch 3.000 EW innovative SBR mit CBR-Steuerung gemäß Energiecheck DWA-A 216

5.2.3. Reinigungsergebnisse

Das Ziel des Vorhabens „Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0“ war es, mit Hilfe einer CBR-Lösung die Anlagensteuerung so zu optimieren, dass eine signifikante Energiereduzierung erreicht wird, bei Einhaltung der behördlichen Grenzwerte. Die einzuhaltenden Grenzwerte zeigt Tabelle 2. Im beauftragten Monitoring wurde festgelegt, die Parameter CSB, BSB₅, NH₄-N, N_{ges}, P_{ges}, pH, Trübung und Menge zu überprüfen und mit den einzuhaltenden Grenzwerten zu vergleichen. Tabelle 37 zeigt als Auszug von Tabelle 2 die zu überprüfenden Grenzwertparameter. Für den Parameter P_{ges} wurde als verfahrenstechnischer Zielwert 0,7 mg/l festgelegt, die Genehmigungsbehörde hat in ihrem wasserrechtlichen Bescheid vom 06.11.2019 den Grenzwert für P_{ges} mit 2 mg/l festgelegt, dieser Wert geht damit in die Vergleichsanalyse ein.

Tabelle 37: Einzuhaltende Überwachungswerte für Ergebnisvergleich

Parameter	Grenzwert	Einheit
CSB	30	mg/l
BSB ₅	8	mg/l
NH ₄ -N	5	mg/l
N _{ges}	15	mg/l
P _{ges}	2 (0,7)	mg/l

Zur Ermittlung der Grenzwerteinhaltung wurden sowohl die Ergebnisse der Onlinesensoren ausgewertet als auch die manuellen Datenerhebungen der Eigenkontrolle der KA Heringhausen. Ergänzend wurden eigene manuelle Datenerhebungen als Plausibilitätskontrolle durchgeführt. Im Verlauf des Monitorings stellte sich heraus, dass insbesondere die Messwerte der eingesetzten Kombinationssensoren NH₄-N, NO₃-N teilweise deutlich von den manuellen Datenerhebungen abwichen. Ebenso wurden starke Unterschiede der Daten der Kombinationssensoren in den beiden SBR-Becken festgestellt, obwohl beide SBR-Becken gleichartig betrieben wurden. In weiteren Untersuchungen stellte sich heraus, dass seitens des Anlagenbetriebs die herstellerseitigen Wartungs- und Kalibrierintervalle nicht eingehalten wurden.

Eine Vergleichsüberprüfung der betreiberseitigen und eigenen manuellen Datenerhebungen hat eine hohe Übereinstimmung gezeigt, so dass der Ergebnisvergleich auf den manuellen Datenerhebungen beruht. Grundlage der Datenerhebung ist der Zeitraum 01.01.2022 bis 31.12.2023.

5.2.3.1. CSB

Gemäß Tabelle 37 beträgt der einzuhaltende Grenzwert für CSB 30 mg/l. Abbildung 64 zeigt den Verlauf des CSB-Ablaufwertes der validierten manuellen Datenerhebungen für den Zeitraum 01.01.2022 bis 31.12.2023. Lediglich einmal am 15.06.2022 wurde mit einem Ablaufwert von 42,6 mg/l der Grenzwert von 30 mg/l überschritten. Der Ausreißer liegt in der Inbetriebnahme- und Optimierungsphase. Danach wurde der Grenzwert über 1 ½ Jahre nicht überschritten.

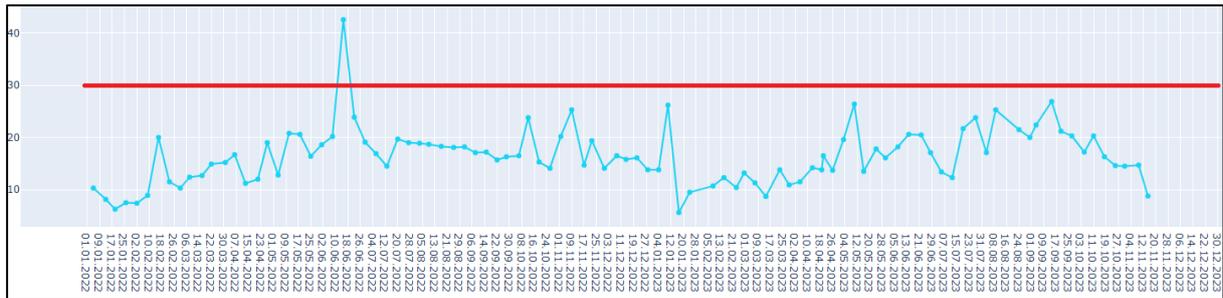


Abbildung 64: CSB-Ablaufwerte KA Heringhausen 01.01.2022 – 31.12.2023

5.2.3.2. BSB₅

Gemäß Tabelle 37 beträgt der einzuhaltende Grenzwert für BSB₅ 8 mg/l. Abbildung 65 zeigt den Verlauf des BSB₅-Ablaufwertes der validierten manuellen Datenerhebungen für den Zeitraum 01.01.2022 bis 31.12.2023. Lediglich zweimal am 15.06.2022 und am 09.11.2022 wurde mit einem Ablaufwert von 12 mg/l bzw. 10 mg/l der Grenzwert von 8 mg/l überschritten. Der erste Ausreißer liegt in der Inbetriebnahme- und Optimierungsphase. Für den zweiten nur knapp über dem Grenzwert liegenden Ausreißer konnte keine eindeutige Ursache gefunden werden. Danach wurde der Grenzwert über 1 Jahr nicht überschritten.

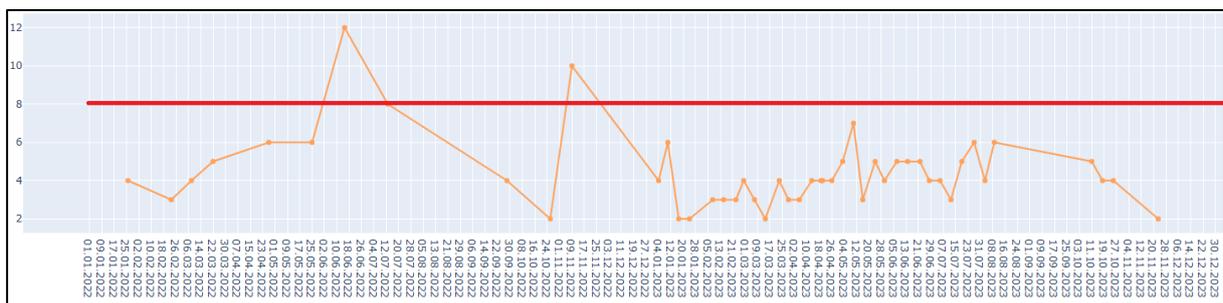


Abbildung 65: BSB₅-Ablaufwerte KA Heringhausen 01.01.2022 – 31.12.2023

5.2.3.5. P_{ges}

Gemäß Tabelle 37 beträgt der einzuhaltende Grenzwert für P_{ges} 2 mg/l. Abbildung 68 zeigt den Verlauf des P_{ges} -Ablaufwertes der validierten manuellen Datenerhebungen für den Zeitraum 01.01.2022 bis 31.12.2023. Der Grenzwert von 2 mg/l wurde keinmal überschritten, alle Werte lagen deutlich darunter. Der maximale Wert betrug am 08.06.2022 und am 20.09.2023 1,6 mg/l.

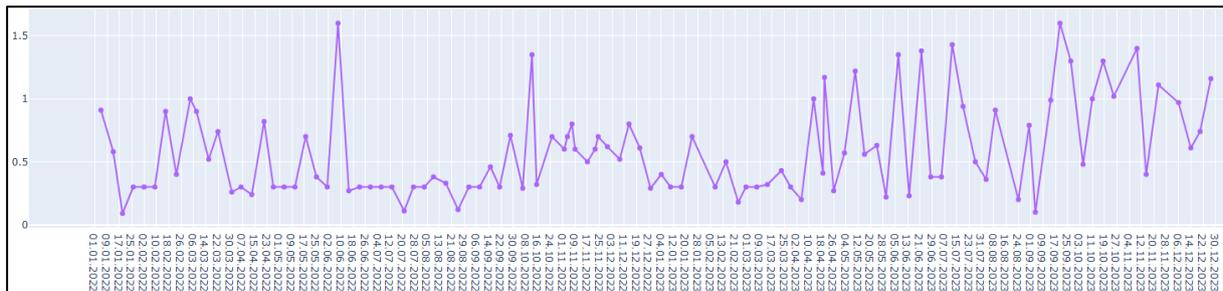


Abbildung 68: P_{ges} -Ablaufwerte KA Heringhausen 01.01.2022 – 31.12.2023

5.2.3.6. Ergebniseinordnung

Die Auswertung der manuellen Datenerhebungen im Zeitraum 01.01.2022 bis 30.12.2023 hat ergeben, dass die KA Heringhausen bei Einsatz des CBR-Verfahrens die behördlich festgesetzten Grenzwerte nahezu uneingeschränkt eingehalten hat. Lediglich der Parameter CSB wurde einmal überschritten, der Parameter BSB_5 zweimal (siehe Tabelle 38). Nach erfolgtem Einfahr- und Optimierungsbetrieb im Jahr 2022 gab es im Jahr 2023 keinerlei Grenzwertüberschreitungen.

Tabelle 38: Auswertung manuell erfasste Ablaufparameter

Parameter	Grenzwert [mg/l]	Max. Wert [mg/l]	Anzahl Proben ¹	Anzahl Überschreitungen	Häufigkeit Überschreitung [%]
CSB	30	42,6	96	1	1,04
BSB_5	8	12	45	2	4,44
NH_4-N	5	4,78	99	0	0
N_{ges}	15	9,25	99	0	0
P_{ges}	2	1,6	99	0	0

¹ verwertbar

5.2.4. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die anteiligen Mehrkosten für das CBR-System wurden anhand der Ausführungsabrechnungen und Nachfrage bei den Anlagenherstellern wie folgt ermittelt:

Table 39: Mehrkosten Anpassung Verfahrenstechnik an CBR-System

Verfahrenstechnik	Herstellkosten brutto [€]	Mehrkosten CBR-Anpassung [€]
Funktionseinheit SBR-Unit (Dekanter, Gebläse, Systemschaltanlage, Misch- und Ausgleichsbecken, Schlamm Speicher, UV-Anlage, smart SBR-Monitor)	395.000,00	118.500,00
Mechanische Vorreinigung	139.698,00	13.969,00
SCADA-System	99.100,00	29.730,00
Schaltanlagen System und Energiemanagement	14.931,00	7.466,00
Lastfallermittlung	75.000,00	37.500,00
myCBR-Programmierung	8.500,00	8.500,00
CBR-Steuerung	23.288,00	23.288,00
Gesamt		238.953,30

Bei angenommenen Strombezugskosten von 0,30 €/kWh ergeben sich Jahresverbrauchskosten gemäß Tabelle 40.

Table 40: Amortisation Mehrkosten CBR zu Energieeinsparung

Vergleichsenergieverbrauch	Gesamt [kWh/a]	Kosten [€/a]
Konventionelle SBR 1.980 EW	171.832	51.549,60
Innovative SBR mit CBR 1.980 EW	52.756	15.826,80
Einsparung	119.076	35.722,80

Bei ermittelten Mehrkosten von 238.953,30 € ergibt sich eine Amortisationszeit von rd. 7 Jahren.

5.2.5. Schwierigkeiten im Zuge des Messprogramms

Mit Datum vom 17.09.2019 erhielt die Gemeinde Diemelsee den Zuwendungsbescheid zum Vorhaben. Wie im Schlussbericht zur Investitionsförderung aufgezeigt, hat es verschiedenartige Hindernisse und Anpassungen gegeben, die in Tabelle 41 zusammenfassend dargestellt sind.

Tabelle 41: Zeitplan Soll-Ist (Quelle: Schlussbericht „Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0“)

Phase	Inhalt	Solltermin	Isttermin	Status
I	Projektvorbereitung	09/2019	11/2019	erledigt
Ila	Technische Ausrüstung der neuen Kläranlage mit M-/EMSR-Technik (SBR-Stufe wurde 09/2020 fertiggestellt)	04/2020	12/2021	erledigt
Ilb	Technische Ausrüstung von Kanalnetz und Sonderbauwerke mit M-/EMSR-Technik	05/2021	2023/24	Aus Förderung herausgenommen
III	Lastenhefterstellung CBR-Steuerungssystem KA	04/2020	12/2020	erledigt
IV	Erstellung Simulationsmodell von Kanal, Sonderbauwerken und Kläranlage	06/2020	12/2020	erledigt
V	Analyse und Festlegung in Frage kommender Lastfälle	07/2020	06/2021	erledigt
VI	Simulation ausgewählter Lastfälle von Kanal, Sonderbauwerken und Kläranlage	10/2020	06/2022	erledigt
VII	Entwicklung / Programmierung CBR-Steuerungssystem	05/2021	09/2022	erledigt

Phase	Inhalt	Solltermin	Isttermin	Status
VIII	Konfiguration Software Plattform	05/2021	09/2022	erledigt
IXa	Implementation und Inbetriebnahme CBR-Steuerungssystem KA	05/2021	10/2022	erledigt
IXb	Implementation und Inbetriebnahme CBR-Steuerungssystem Gesamtsystem	06/2021	2023	erledigt
X	Testphase KA Heringhausen inkl. Prüfung und ggf. Adaption/Erweiterung der vorausgewählten Lastfälle sowie Anpassung CBR-Steuerung	09/2021	11/2022	Teilweise erledigt, Fortführung Tests parallel zum Monitoring
XI	Ausrüstung Pumpstationen	03/2021	2023/24	Aus Förderung heraus - genommen
XII	Erfolgskontrolle Kanalnetz und Sonderbauwerke	12/2021	2023	In Beantragung

Für das hier vorgestellte Monitoringergebnis waren neben den zuvor aufgezeigten Projekthindernisse auch die Art und Weise der Unterstützung des externen Anlagenbetreibers der Gemeinde Diemelsee beeinflussend.



Die Gemeinde Diemelsee verfügt über kein eigenes Personal für die Betreuung der eigenen Abwasseranlagen. Hierzu wurde mit den Stadtwerken Brilon ein entsprechender Betreibervertrag geschlossen, der bis heute gültig ist. Mit Start der Planung der neuen SBR-Kläranlage im Jahr 2018 wurde von Beginn der damals verantwortliche Abwassermeister aktiv mit in das Planungsteam eingebunden, um alle betrieblichen Belange rechtzeitig und fachgerecht in die neue Lösung einfließen zu lassen. Eine Entscheidung, die sich im Nachhinein als sehr wertvoll erwiesen hat. Diese Person war auch in der gesamten Phase der CBR-Entwicklung involviert. Gerade seine Expertise und Betriebserfahrung war von großem Wert bei der Festlegung der verschiedenen Lastfälle, die dem CBR-Bewertungsalgorithmus zugrunde lagen. Mit ihm wurden nicht nur die verschiedenen Lastfälle identifiziert und fachgerecht beschrieben, sondern auch die Ergebnisbewertung der durchgeführten SIMBA-Modellsimulationen vorgenommen und die für den späteren Betrieb relevanten Lastfälle ausgewählt. Darüber hinaus betreute diese Person die softwareseitige Umsetzung und erklärte den Programmierern bzw. den IT-Fachexperten, ob die erstellten Algorithmen praxistauglich oder zu verbessern waren.

Mit Start des Betriebs im Jahr 2021 verließ diese Person die Stadtwerke Brilon und wechselte auf die Seite der Diemelsee Abwasser GmbH, einer Projektgesellschaft der Gemeinde Diemelsee und der Energieversorgung Waldeck-Frankenberg, die für die Planung, Herstellung und Übergabe (nach Ablauf der Gewährleistung) der neuen Kläranlage Heringhausen verantwortlich ist. Auf Seiten der Stadtwerke Brilon wurden neue Personen eingearbeitet, allerdings mit weitaus weniger Betriebserfahrung und Fachkompetenz als der bisherige Abwassermeister. Während der erfahrene Abwassermeister bis zu seinem Weggang von den Stadtwerken Brilon den gesamten operativen Ablauf der Kläranlagenbetreuung in Heringhausen verantwortete, übernahm er nach dem Wechsel zur Energieversorgung Waldeck-Frankenberg für die Diemelsee Abwasser GmbH eine Art Supervisorrolle und war nur noch beratend tätig. Auch wenn er ähnlich wie in seiner Rolle als Vorgesetzter Abwassermeister dem Bedienpersonal die wesentlichen Handlungsanweisungen aussprach, wurden diese nach dem Rollenwechsel nicht immer in der nötigen Konsequenz befolgt. Dies spiegelte sich beispielsweise in einer unzureichenden Wartung der Messsensoren oder nachlässigen Sollwertanpassung im SCADA-System wider. Daher konnten die Onlinemessungen in den SBR-Reaktoren für die Bewertung nicht herangezogen werden (siehe Kapitel 5.1.1). Nur durch die stetige Begleitung des ehemaligen Abwassermeisters als neuer Supervisor konnten mögliche negative Folgen der den Anlagenbetrieb rechtzeitig entdeckt und frühzeitig korrigiert werden und es wurde ein positives Ergebnis des UIP-Projektes erreicht.

5.3. Ergebnisbewertung

Das im Rahmen des UIP-Projektes entwickelte CBR-Programm wurde mit dem neuen SCADA-Programm der Kläranlage Heringhausen verbunden. Die aktuellen Zulaufparameter werden in die CBR-Systematik übertragen und es wird überprüft, mit welchem der hinterlegten Lastfälle die aktuelle Zulaufsituation die größten Übereinstimmungen hat. Ist dies identifiziert, kann das Betriebspersonal nach entsprechender Schulung passende Sollwertparameterkombinationen verwenden, um den energieeffizientesten Betrieb unter Einhaltung der Reinigungsziele zu ermöglichen.

Das CBR-Verfahren hat die Erwartungen des Fördervorhabens erfüllt und die gesteckten Ziele einer weitergehenden Energiereduzierung mit bis zu 70 % gegenüber konventionellen SBR-Kläranlagen unter Einhaltung der vorgegebenen Reinigungsziele erreicht. Damit gehört die SBR-Kläranlage Heringhausen zu den besten 5 % an Kläranlagen aller Größenordnungen gemäß DWAA 216.

6. Übertragbarkeit auf andere Anlagen

6.1. Hohe Anzahl auslaufender Genehmigungen

In Deutschland laufen zunehmend die Genehmigungen mehrerer hundert Kläranlagen bis 5.000 EW aus. Eine Genehmigungsverlängerung ist bei nahezu allen Anlagen aufgrund gestiegener Anforderungen ausgeschlossen. Oftmals wird nur der komplette oder Teilneubau analog zu Heringhausen dazu führen, dass die aktuellen und zukünftigen Anforderungen eingehalten werden können. Die CBR-Lösung Heringhausen soll als Muster für viele Kläranlagen, auch für Anlagen > 5.000 EW, eine angemessene Lösung darstellen, egal ob für einen Neubau oder eine Teilsanierung.

Auch wenn in Heringhausen eine hohe Ausnutzung von verfahrens- und betriebstechnischen Vorteilen der CBR-Steuerung durch Verwendung des SBR-Verfahrens erreicht werden kann, eignet sich die CBR-Steuerung auch für klassische Durchlaufanlagen, insbesondere wenn das zugehörige Kanalnetz mit integriert wird. Zwar kann systembedingt innerhalb des Verfahrensprozesses einer Durchlaufanlage keine vergleichbare Prozessanpassung wie bei SBR-Verfahren erfolgen, aber durch die Vorhersage zu erwartender Zulaufbedingungen können einzelne Prozessadaptionen vorgenommen werden.

6.2. Hohe Akzeptanz des CBR-Verfahrens

Studien der Hochschule Hof zeigen, warum sich die deutschsprachige Wasserwirtschaft mit einer weiterentwickelten Digitalisierung immer noch sehr schwertut. U.a. besteht auf Anwenderseite ein großer Wunsch nach Transparenz/Nachvollziehbarkeit, insbesondere wenn es um KI-basierte Lösungen geht⁴⁴. Ein weiterer Aspekt ist die frühe Einbeziehung der Betriebsmitarbeiter, die in vielen Fällen entweder vernachlässigt oder sogar komplett unterlassen wird. Bereits im Jahr 2016 wurden im Forschungsprojekt KOMMUNAL 4.0 Lösungsansätze entwickelt, Erfahrungswissen zu erfassen und zu digitalisieren, um es in automatisierte Prozesse zu integrieren⁴⁵, auf dessen Erfahrungen auch das Vorhaben „Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0“ entwickelt wurde. Dabei zeigte sich, dass gerade komplexe und multikriterielle Entscheidungsprozesse vom Betriebspersonal wesentlich detaillierter und auch in Bezug auf mögliche Vorhersageszenarien genauer beschrieben werden konnten. Das Erkennen von Muster mittels KI-Algorithmen verbessert sich zwar zunehmend, ist aber für Entscheidungen im Bereich der Umwelttechnik, wo falsche Entscheidungen verheerende Folgen haben könnten, noch zu ungenau und wird daher nur schwer akzeptiert. Insbesondere das Ableiten von Erkenntnissen und daraus erforderliche Handlungen erfordert in der Umwelttechnik weitaus mehr als ein schnelles Berechnen möglicher Korrelationen. Hinzu kommt, dass gerade die kritischen und risikorelevanten Ereignisse komplex sind und nur vereinzelt auftreten und damit für ein selbstlernendes System zu wenig Lerndaten zur Verfügung stehen.

⁴⁴ Müller-Czygan, G., Tarasyuk, V., Wagner, C. und Wimmer, M. Die deutschsprachige Wasserwirtschaft im Jahr 2020/21 – Metastudie „WaterExe4.0“ zeigt Erfolgsfaktoren und Erwartungen für die digitale Zukunft auf. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. (2022). <https://doi.org/10.1007/s00506-022-00850-z>

⁴⁵ Müller-Czygan, G.; Smart Water – how to master the future challenges of water management. IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.90644.

Auf Basis von myCBR (siehe Kapitel 4.2.2) wurde ein einfaches CBR-Modell erstellt, welches es anhand vier einfach zu ermittelnder Kriterien erlaubt, neue Fälle mit ähnlichen Fällen aus der Datenbank zu vergleichen. So wurden mit dem Betriebspersonal verschiedene Lastfälle identifiziert und definiert. Perspektivisch kann in Zukunft die erstellte Fallbasis durch neu ermittelte reale Betriebsdaten erweitert bzw. schrittweise ersetzt werden. Für die aktuell vorliegende Fallbasis wurde das SCADA-System bereits mit einer Falldaten- und Sollwertparametermatrix erweitert. In dieser Matrix sind alle für die Steuerung erforderlichen Sollparameter, die als Ergebnis der bisher vorliegenden Lastfallsimulationen in SIMBA# errechnet wurden, bereits eingetragen.

6.3. Exemplarische Größe Heringhausen

Da das Heringhauser-CBR-Modell exemplarisch ist für die meisten Kläranlagen in Deutschland (von den ca. 9.000 Kläranlagen in Deutschland sind ca. ein Drittel in einer vergleichbaren Größenordnung wie Heringhausen - Abbildung 69). Mehr als 95 % der Kläranlagen in Deutschland haben eine biologische Behandlungsstufe wie Heringhausen, mehr als 70 % verfügen sogar über eine weitergehende Abwasserreinigung wie Heringhausen (Abbildung 70).

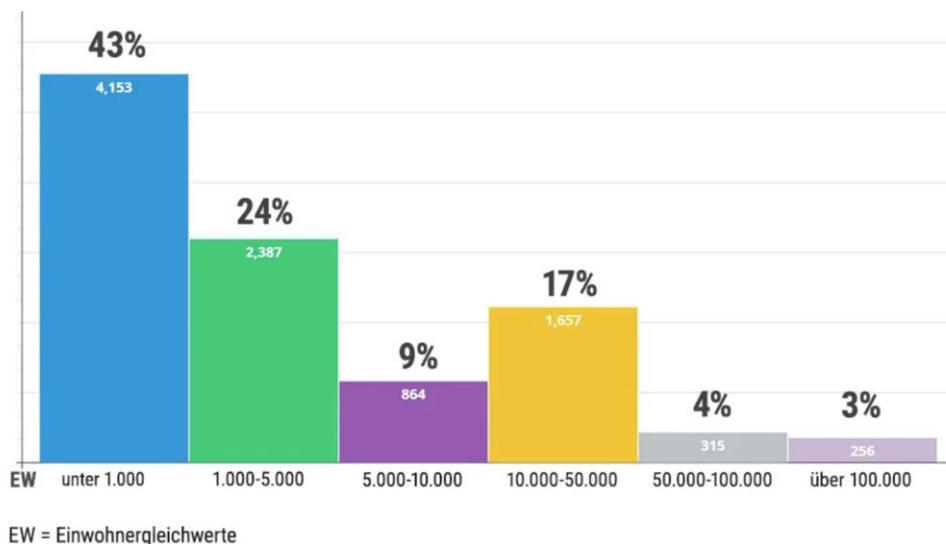
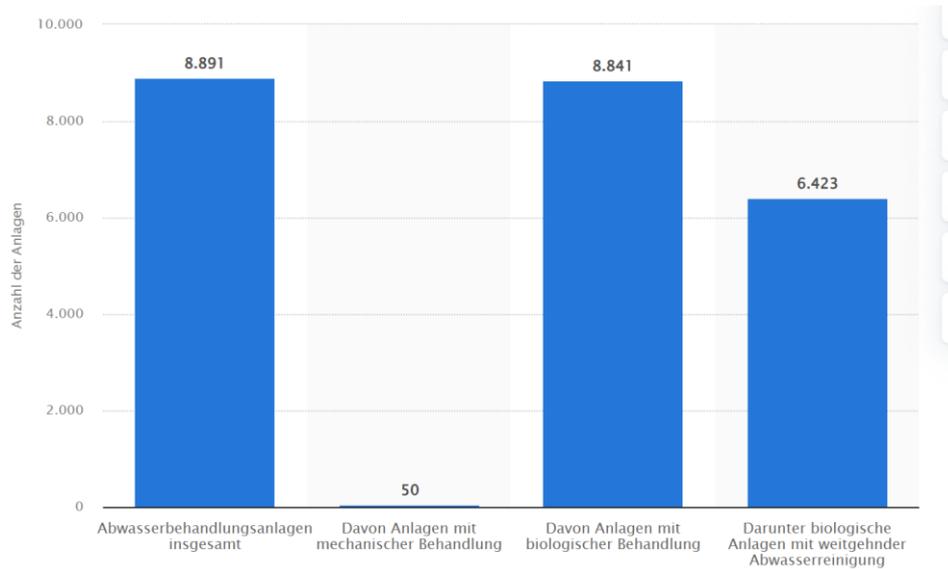


Abbildung 69: Verteilung Größenklassen der öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen in Deutschland⁴⁶

⁴⁶ <https://www.klaeranlagen-vergleich.de/groesse-von-klaeranlagen.html>



© Statista 2024

Abbildung 70: Anzahl der öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen in Deutschland nach Anlagenart

Da das tätige Personal vorwiegend gewerblich ausgebildet ist, ist eine Funktionsbeschränkung auf einen Soll-Ist-Vergleich zwischen Lastfallmöglichkeiten und Realität auch aus Akzeptanzgründen zielführend. Damit wird auch eine Schwäche der Ursprungsversion des CBR-Verfahrens begrenzt, die in der eingeschränkten Fähigkeit liegt, Regeln zu schaffen bzw. die Erfahrungen zu verallgemeinern oder eigene Klassifizierungen zu schaffen. Durch die Festlegung definierter Lastfälle (und damit auch Klassifizierungen) ist diese Funktion für Kläranlagen wie in Heringhausen auch nicht notwendig. Diese Vorgehensweise erfordert die umfassende Beteiligung des Betriebspersonals, was ein hohes Akzeptanzmotiv und ein wesentlicher Erfolgsfaktor für eine erfolgreiche Umsetzung darstellt.

7. Fazit und Ausblick

Das durchgeführte Monitoring des UIP-Projekts „Abwasserflexibilisierung Diemelsee 4.0“ hat den erfolgreichen erstmaligen Einsatz des CBR-Verfahrens auf einer SBR-Kläranlage < 10.000 EW bestätigt. Sowohl die erreichten Energieeinsparungen entsprechen den Zielvorstellungen des Vorhabens als auch die sichere Einhaltung der Reinigungsergebnisse ist gewährleistet.

Angesichts des Fachkräftemangels eignet sich das CBR-Verfahren zudem für die Analyse und Sicherung von Fachwissen, insbesondere derjenigen Mitarbeiter, die hohes Erfahrungswissen besitzen und z. B. aufgrund von Ruhestand den Anlagenbetrieb verlassen.

Die errechnete Amortisationszeit für die angefallenen Mehrkosten können für das Projekt KA Heringhausen mit rd. 7 Jahren angesetzt werden. Bei steigenden Strombezugskosten verkürzt sich die Amortisationszeit.

Folgende Aspekte lassen sich aufgrund der vorliegenden Ergebnisse als allgemeine Empfehlung für den Einsatz von CBR-Steuerungen formulieren:

- Es ist möglich, bei angekündigten Regenperioden, bei denen mit einer hohen Ammoniumfracht gerechnet werden muss, die Belüftungsphasen derart anzupassen, dass mit Eintreffen der zusätzlichen Ammoniumfracht der Ammoniumgehalt in den Belebungsbecken so weit wie möglich abgebaut ist, damit die Spitzenfrachten im Belebungsbecken bearbeitet werden können und es zu keiner Überfrachtung und damit Gewässerverunreinigung kommt.
- Belüftungssysteme können auf Basis einer besseren Datengrundlage viel besser an die realen Prozessbedingungen angepasst werden als bisher, um unnötige Belüftungsphasen und -spitzen zu vermeiden, um so Energie einzusparen.
- Durch Einbezug des Kanalnetzes lassen sich die Spitzenzuläufe zur Kläranlage durch eine bessere Ausnutzung von Kanalstauräumen und Rückhaltebecken verringern/ausbalancieren. Eine derartige Kanalnetzbewirtschaftung wird nicht nur für einen stabilen Betrieb und für eine effiziente Nutzung von Ressourcen angewendet, sondern kann auch als ein Instrument für ein flexibles und damit anpassungsfähiges Kanalnetz an die Auswirkungen des Klimawandels betrachtet werden.

Hof, den 30.09.2024

Prof. Günter Müller-Czygan

Viktoriya Tarasyuk (PhD)

Pavel Timofeev (B.Eng.)