



Lehrstuhl für Energieverbundtechnik

Dissertation

Kommunale Abwasserreinigungsanlagen  
mit optionaler thermischer  
Klärschlammverwertung als  
Flexibilitätsdienstleister in elektrischen  
Netzen

Mag.rer.soc.oec. Dipl.-Ing. Kerstin Pflieger-Schopf, BSc.

Oktober 2021





**EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 06.10.2021

Unterschrift Verfasser/in

**Kerstin Pflieger-Schopf**

Hiermit soll ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass das in der vorliegenden Dissertation verwendete generische Maskulinum sich zugleich auf männliche, weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten bezieht.



### **KURZFASSUNG**

Die verstärkte Einbindung erneuerbarer Energieträger in die Energieversorgungsstruktur stellt eine wichtige Komponente in der Klima- und Energiepolitik der EU und von Österreich dar. Konkrete Ausbauziele für 2030 stützen sich vor allem auf die Kapazitätserhöhung der volatilen, erneuerbaren Elektrizitätsversorgung aus Photovoltaik- (+11 TWh<sub>el</sub>) und Windanlagen (+10 TWh<sub>el</sub>). Der damit verbundene steigende Anteil an volatilen Elektrizitätsquellen in Nieder- und Mittelspannungsnetzen, führt zu abwechselnden Perioden mit erneuerbarer Elektrizitätsüber- bzw. -unterversorgung. Das volatile erneuerbare Elektrizitätsangebot bedingt daher Flexibilitätsdienstleister, welche Flexibilitätsoptionen (z.B. Last- oder Speicher-management) zum laufenden Angleich von Elektrizitätsnachfrage und -angebot bieten. Betrachtet man die dezentrale Anordnung kommunaler Abwasserreinigungsanlagen, sowie deren energieintensive Reinigungsprozesse, die interne Energieaufbringung und die meist vorhandenen Speichermöglichkeiten für Gas und Klärschlamm, wird deutlich, dass diese als dezentrale Flexibilitätsdienstleister in Nieder- und Mittelspannungsnetzen dienen können.

Da zur Einsatzplanung von Flexibilitätsoptionen im elektrischen Netz zeitlich aufgelöste Last- und Aufbringungsprofile, sowie zeitlich aufgelöste Flexibilitätspotentiale benötigt werden, wird in der vorliegenden Dissertation die Application Software OPTIEVLEX entwickelt. OPTIEVLEX ermöglicht neben stationären Analysen von energietechnischen Charakteristika (z.B. Energieautarkiegrad) kommunaler Abwasserreinigungsanlagen, die Ermittlung deren zeitlich aufgelöster Leistungsprofile, sowie theoretischer und realisierbarer Flexibilitätspotentiale. Letzteres wird im Rahmen von netz- und systemdienlichen Szenarien untersucht, um die Rolle als Flexibilitätsdienstleister in Erneuerbaren Energiegemeinschaften bzw. zur Bereitstellung von Regelleistung analysieren zu können. Zusätzlich berücksichtigt OPTIEVLEX Aggregate zur Klärschlammnutzung, um deren Einfluss auf die Charakteristika, Profile und Potentiale zu untersuchen. Die mit OPTIEVLEX gewonnenen Erkenntnisse sollen Anlagenbetreiber bei Investitionsentscheidungen unterstützen und Netzbetreiber, sowie Energieversorger auf neue Belastungssituationen im elektrischen Netz vorbereiten.

Als essenzielles Ergebnis der mit OPTIEVLEX durchgeführten Analysen gilt hervorzuheben, dass zur Abschätzung des zeitlich aufgelösten realisierbaren elektrischen Flexibilitätspotentials kläranlagenspezifische Analysen essenziell sind. Zudem wird gezeigt, dass eine thermische Klärschlammverwertung sowohl die Energie- und Kostenkennzahlen als auch das Flexibilitätspotential positiv beeinflussen kann. Werden die Flexibilitätspotentiale eingesetzt, können diese in Erneuerbaren Energiegemeinschaften, sowie bei der Bereitstellung von Sekundär- und Tertiärregelleistung mit Erlösen verbunden sein, die zu einer Reduktion der jährlichen Kosten beitragen und zur Wirtschaftlichkeit von Flexibilitätsmaßnahmen führen.

### **ABSTRACT**

The increased integration of renewable energy sources into the energy supply structure represents an important element in the climate and energy policy of the EU and Austria. Specific expansion targets for 2030 are primarily based on increasing the capacity of volatile, renewable electricity supply from photovoltaic (+11 TWh<sub>el</sub>) and wind power plants (+10 TWh<sub>el</sub>). The increasing share of volatile electricity sources in low and medium voltage grids leads to alternating periods of renewable electricity surpluses and shortfalls. The volatile renewable electricity supply therefore requires flexibility service providers that offer flexibility options (e.g. load or storage management) to balance electricity demand and supply continuously. Considering the decentralised arrangement of municipal wastewater treatment plants as well as their energy intensive treatment processes, internal energy supply, and the existing storage capacities for gas and sewage sludge, it can be derived that they can serve as decentralised flexibility service providers in low and medium voltage grids.

Due to the necessity of time-resolved load and generation profiles as well as time-resolved flexibility potentials for the operational planning of flexibility options in the electricity grid, the application software OPTIEVLEX is developed. OPTIEVLEX enables static analyses of energy characteristics (e.g. degree of energy self-sufficiency) of municipal wastewater treatment plants as well as the determination of their time-resolved load profiles and theoretical and feasible flexibility potentials. The latter is examined with grid- and system-serving scenarios to be able to analyse the role of wastewater treatment plants as flexibility service providers in renewable energy communities or for the provision of balancing power. In addition, OPTIEVLEX considers decentralised sewage sludge utilisation to analyse their influence on the energy characteristics, load profiles, and flexibility potentials. The knowledge gained through OPTIEVLEX is intended to support plant operators in investment decisions and to prepare grid operators and energy suppliers for new load situations in the electricity grid.

As an essential result of the analyses with OPTIEVLEX, it can be emphasised that treatment-plant-specific analyses are essential for estimating the time-resolved feasible electric flexibility potential. Furthermore, it is shown that thermal sewage sludge utilisation can positively influence both the energy and cost indicators as well as the flexibility potential. If the flexibility potentials are used, they can be associated with revenues in renewable energy communities, as well as in the provision of secondary and tertiary control power. This leads to a reduction in annual costs and therefore, to the economic viability of flexibility measures.

# VORWORT

Allen voran möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Kienberger danken. Als Leiter des Lehrstuhls für Energieverbundtechnik bot er mir mit der Dissertationsstelle die Chance mich am Aufbau eines erst gegründeten, jungen und dynamischen Lehrstuhles zu beteiligen. Die durch Eigenverantwortung und Vertrauen geprägte Arbeitsatmosphäre ermöglichte mir Erfahrungen in der Planung und Leitung von Forschungsprojekten mit Partnern aus Industrie, Wirtschaft und Wissenschaft, sowie in der Bewältigung von komplexen Problemstellungen in spannenden Forschungsfeldern zu sammeln. Für die regelmäßigen konstruktiven PhD-Talks, sowie die bestmögliche Betreuung meines Dissertationsvorhabens bin ich sehr dankbar.

Zudem möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch für die spontane Übernahme der Rolle des Mentors bedanken.

Die Kollegen am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik haben meine Dissertationszeit durch ihre aufgeschlossene, motivierende und unterstützende Art geprägt. Danke für die offenen Türen, konstruktiven Diskussionen und allgegenwärtige Hilfsbereitschaft. Ein besonderer Dank geht an Julia, Lukas und Christoph die mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen. Und nicht nur das, auch mein Motivationslevel und mein Insulinspiegel dankt euch für all die Schokoladenstücke und Gummibärchen. Vielen Dank auch an Jasmin und Rebekka die mir immer wieder organisatorisch den Rücken freigehalten haben. Ich habe die Zeit mit euch sehr genossen und hoffe, dass uns die gewonnene Freundschaft auch in Zukunft verbindet.

Allen Studenten die ich im Rahmen von Projekt-, Bachelor- und Masterarbeiten zu meiner Forschungsthematik betreuen durfte und die damit einen Beitrag zu dieser Dissertation geleistet haben möchte ich ebenfalls danken. Ein besonderer Dank gilt Paul für die Unterstützung bei der Modellierung von OPTIEVLEX.

Ein herzliches Dankeschön schulde ich auch dem Team der KOPF SynGas GmbH & Co. KG, die mit einem Forschungsprojekt zur Integration thermischer Klärschlammvergasung in das Energiesystem von kommunalen Abwasserreinigungsanlagen den Anstoß für meine Dissertation gegeben haben. Danke für die erfolgreiche Zusammenarbeit, die gemeinsamen Veröffentlichungen, die Unterstützung bei diversen Modellierungsschritten und die konstruktiven Diskussionen. Weiterer Dank gilt allen Personen, die Daten und ihr Wissen zur Verfügung gestellt haben.

## Vorwort

---

Ganz besonders danken möchte ich meiner Mutter Johanna Schopf, die mir ein Studium und damit die Dissertation erst ermöglichte und mich immer tatkräftig unterstützt hat. Danke für die Stunden in denen du mit meiner Tochter Helena die Welt erkundet hast, um mir Dissertationszeit einzuräumen. Danke auch an meinen Stiefvater, meine Geschwister und alle Freunde, die bereits zur Familie wurden, für die Ermunterungen und den Beistand, den sie mir während meines Studiums leisteten: Ihr motiviert mich immer wieder zu Höchstleistungen!

Vor allem möchte ich mich jedoch bei meinem geliebten Mann Bernd Pfleger-Schopf bedanken. Ich danke dir für deine Unterstützung in allen Phasen der Dissertation: Für deine Bereitschaft in meine Forschungsthematik einzutauchen, dein kritisches Hinterfragen, die stundenlangen Diskussionen, sowie deine motivierenden und aufbauenden Worte in Zeiten von Rückschlägen. Danke, dass du mir während des letzten Jahres seit der Geburt unserer Tochter durch deine Fürsorge arbeitsintensive Nacht- und Tagschichten ermöglicht hast. Du bist das größte Geschenk und die wichtigste Stütze, nicht nur in dieser Phase unseres Lebens.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Nomenklatur</b> .....	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Aufbau der Dissertation .....	4
1.2 Publikationsliste .....	6
1.2.1 Eng zugeordnete Publikationen .....	6
1.2.2 Zugeordnete, weitere Publikationen .....	7
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>8</b>
2.1 Kommunale ARA .....	8
2.2 Funktionsweise und Aufbau kommunaler ARAs .....	9
2.2.1 Belebtschlammverfahren .....	9
2.2.2 Aerobe versus anaerobe Schlammstabilisierung .....	10
2.2.3 Aufbau kommunaler ARAs mit Belebtschlammverfahren .....	11
2.2.4 Vierte Reinigungsstufe .....	15
2.3 Klärschlammnutzung .....	15
2.3.1 Dezentrale Trocknung .....	18
2.3.2 Dezentrale thermische Verwertung .....	18
2.4 Energietechnische Charakteristika kommunaler ARAs .....	20
2.4.1 Elektrizitätsbedarf kommunaler ARAs .....	20
2.4.2 Wärmebedarf kommunaler ARAs .....	22
2.4.3 Dezentrale Elektrizitäts- und Wärmeaufbringung kommunaler ARAs .....	23
<b>3 Stand der Forschung</b> .....	<b>26</b>
3.1 Simulation im Kontext der kommunalen Abwasserbehandlung .....	26
3.2 Flexibilisierung kommunaler Abwasserreinigungsanlagen .....	27
3.2.1 Flexibilität und deren Einsatzmöglichkeit im elektrischen Netz .....	28

# Inhaltsverzeichnis

---

3.2.2	Flexibilität und deren Einsatzmöglichkeiten im elektrischen Netz im Kontext der kommunalen Abwasserreinigung .....	31
<b>4</b>	<b>Abgrenzung und Zielsetzung.....</b>	<b>43</b>
4.1	Offene Forschungsfragen auf Basis des Standes der Forschung .....	43
4.2	Forschungsfrage .....	45
4.3	Forschungsziel .....	46
<b>5</b>	<b>OPTIEVLEX – Aufbau und theoretischer Hintergrund.....</b>	<b>48</b>
5.1	Überblick zum Aufbau der Application Software OPTIEVLEX .....	50
5.1.1	Modellierungsschritte zum Aufbau von OPTIEVLEX .....	50
5.1.2	Teilmodelle von OPTIEVLEX und deren Anwendungsoptionen für potenzielle Nutzer .....	53
5.2	Definition der Kennzahlen zum Vergleich der Energieverbunde und Szenarien .....	56
5.2.1	Energiekennzahlen .....	56
5.2.2	Kostenkennzahlen .....	58
5.2.3	Flexibilitätskennzahlen.....	61
5.3	Schritt 1: Stationäres Massen- und Energiebilanzmodell des Systems „kommunale ARA“ .....	62
5.3.1	Systemgrenze.....	62
5.3.2	Zulauf.....	64
5.3.3	Allgemeine Einleitung zur Modulbeschreibung .....	65
5.3.4	Modul „Zulaufpumpwerk“ .....	67
5.3.5	Modul „Rechenanlage“ .....	70
5.3.6	Modul „Sand- und Fettfang“ .....	72
5.3.7	Modul „Vorklärbecken“ .....	73
5.3.8	Modul „Belebungsbecken“ .....	75
5.3.9	Modul „Phosphorelimination“ .....	77
5.3.10	Modul „Nachklärbecken“.....	78
5.3.11	Module „Voreindicker“ und „Eindicker“ .....	80
5.3.12	Modul „Faulturm“ .....	82

## Inhaltsverzeichnis

---

5.3.13 Modul „Entwässerung“ .....	84
5.4 Schritt 2: Stationäre Massen- und Energiebilanzierung des erweiterten Systems „Energieverbund“ .....	85
5.4.1 Systemgrenzen.....	85
5.4.2 Modul „Faulgasnutzung“ .....	86
5.4.3 Modul „Trockner“ .....	89
5.4.4 Modul „Klärschlammnutzung“ .....	91
5.5 Schritt 2-1: Thermodynamische Simulation des Vergaser-prozesses mittels Aspen Plus.....	95
5.5.1 Kopf SynGas Konzepte zur thermischen Klärschlammvergasung .....	95
5.5.2 Simulationsmodell in Aspen Plus.....	97
5.5.3 Analysen mit Aspen Plus .....	98
5.6 Schritt 3: Erstellung des Steady-State-Teilmodell 1 .....	99
5.6.1 Systemgrenzen.....	99
5.6.2 Überblick zum Aufbau des Steady-State-Teilmodells 1 .....	99
5.6.3 Block „Trockenwetter-Zulaufmodell“ .....	101
5.6.4 Block „Regenauswertung“ .....	102
5.6.5 Block „Modelltransformation“ .....	104
5.7 Schritte 4 und 5: Erstellung des Steady-State-Teilmodells 2 .....	109
5.7.1 Systemgrenzen.....	109
5.7.2 Überblick zum Aufbau des Steady-State-Teilmodells 2 .....	111
5.7.3 Block „Abrufmodell“ .....	112
5.7.4 Block „Flexibilitätseinsatzmodell“ .....	114
5.8 Validierung von OPTIEVLEX.....	119
5.8.1 Validierung Schritt 1: Stationäre Massen- und Energiebilanzierung des Systems „kommunale ARA“ .....	121
5.8.2 Validierung Schritt 2: Stationäre Massen- und Energiebilanzierung des erweiterten Systems „Energieverbund“ .....	124
<b>6 Analysen mit OPTIEVLEX .....</b>	<b>130</b>

# Inhaltsverzeichnis

---

6.1	Analyse 1: Identifikation von energietechnisch optimierten Energieverbunden .....	131
6.1.1	Spezifikation des Systems „Energieverbund“ .....	133
6.1.2	Analyse und Diskussion der Energieverbunde anhand der elektrischen und thermischen Energieautarkiegrade .....	137
6.2	Analyse 2: Theoretische Flexibilitätspotentiale ausgewählter energietechnisch optimierter Energieverbunde .....	140
6.2.1	Definition der Nutzerspezifikationen - Block „Modelltransformation“ .....	140
6.2.2	Analyseergebnisse: Elektrische Jahreslast- und -aufbringungsprofile ausgewählter energietechnisch optimierter Energieverbunde .....	141
6.2.3	Analyseergebnisse: Zeitlich aufgelöstes theoretisches Flexibilitätspotential ausgewählter energietechnisch optimierter Energieverbunde .....	143
6.3	Analyse 3 und 4: Realisierbare Flexibilitätspotentiale ausgewählter energietechnisch optimierter Energieverbunde in netz- und systemdienlichen Szenarien .....	145
6.3.1	Definition der Systemgrenzen .....	146
6.3.2	Definition der Nutzerspezifikationen - Block „Regenauswertung“ .....	148
6.3.3	Definition der Nutzerspezifikationen - Block „Abrufmodell“ .....	148
6.3.4	Definition der Nutzerspezifikationen - Block „Flexibilitätseinsatzmodell“ .....	150
6.3.5	Analyseergebnisse: Referenzszenario .....	152
6.3.6	Analyseergebnisse: Netzdienliche Szenarien .....	156
6.3.7	Analyseergebnisse: Systemdienliche Szenarien .....	180
<b>7</b>	<b>Diskussion der Analysen und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>190</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>197</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>200</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>215</b>
10.1	Aggregatspezifische Flexibilitätssparameter .....	215
10.2	Bewertung der Beeinflussung und Nutzbarkeit flexibler Aggregate bei Regenwetterzufluss .....	216
10.3	Strom- und Erdgaspreis für Nicht-Haushaltskunden in Österreich im Jahr 2019 .....	217
10.4	Modul „Zulaufpumpwerk“ – Inputparameter & Literaturwerte .....	218
10.5	Modul „Rechenanlage“ – Inputparameter & Literaturwerte .....	219



## Inhaltsverzeichnis

---

10.6 Modul „Sand- und Fettfang“ – Inputparameter & Literaturwerte .....	220
10.7 Modul „Vorklärbecken“ – Inputparameter & Literaturwerte .....	221
10.8 Modul „Belebungsbecken“ – Inputparameter & Literaturwerte .....	222
10.9 Modul „Phosphorelimination“ – Inputparameter & Literaturwerte.....	224
10.10 Modul „Nachklärbecken“ – Inputparameter & Literaturwerte .....	224
10.11 Modul „Eindicker“ – Inputparameter & Literaturwerte .....	225
10.12 Modul „Faulturm“ – Inputparameter & Literaturwerte .....	227
10.13 Modul „Entwässerung“ – Inputparameter & Literaturwerte.....	228
10.14 Modul „Faulgasnutzung“ – Inputparameter & Literaturwerte .....	229
10.15 Modul „Trockner“ – Inputparameter & Literaturwerte .....	231
10.16 Modul „Klärschlammnutzung“ – Inputparameter & Literaturwerte.....	232
10.17 Block „Modelltransformation“ – Inputparameter .....	236
10.18 Analyse 3 und 4 – Detailinformationen .....	237

### NOMENKLATUR

a	aerob
an	anaerob
APG	Austrian Power Grid
ARA	Abwasserreinigungsanlage
ASM	Activated Sludge Modell
$B_{d,CSB}$	Mittlere tägliche CSB-Fracht
BB	Belebungsbecken
BEEV	Bruttoendenergieverbrauch
BHKW	Blockheizkraftwerk
CS	Co-Substrat
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
E	Entwässerung
EAG	Energieautarkiegrad
ED	Eindicker
EEG	Erneuerbare-Energiegemeinschaften
EGW	Einwohnergleichwert
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
EV	Eigenverbrauchsanteil
EW	Einwohnerwert
EZ	Einwohnerzahl

## Nomenklatur

---

FG	Faulgas
FGN	Faulgasnutzung
FT	Faulturm
GK	Größenklasse
HK	Heizkessel
HT	Hochtemperatur
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
KSN	Klärschlammnutzung
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LAG	Leistungsautarkiegrad
MGT	Mikrogasturbine
MT	Mitteltemperatur
ND	Nutzungsdauer
NKB	Nachklärbecken
NL	Nachgefragte Last
NS	Nutzschlamm
OPTIEVLEX	<b>Optimierte Energieverbunde kommunaler Abwasserreinigungsanlagen als Flexibilitätsdienstleister in den elektrischen Netzen der Zukunft.</b>
ORC	Organic Rankine Cycle
oTS	Organische Trockensubstanz
ÖWAV	Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband
PE	Phosphorelimination
PG	Produktgas
PRL	Primärregelleistung
PS	Primärschlamm

## Nomenklatur

---

PV	Photovoltaik
RA	Rechenanlage
RL	Residuallast
RLS	Rücklaufschlamm
RZS	Rezirkulationsschlamm
SFF	Sand- & Fettfang
SOTR	Standard-Sauerstoffzufuhr
SRL	Sekundärregelleistung
SS	Sekundärschlamm
T	Trockner
TG	Trockengehalt
TKN	Total Kjeldahlstickstoff = organischer Stickstoff + NH <sub>4</sub>
TN	Gesamtstickstoff
TP	Gesamtphosphor
TRL	Tertiärregelleistung
TS	Trockensubstanz
TTS	Tertiärschlamm
VB	Verbrennung
VED	Voreindicker
VEE	Volatile erneuerbare Energie
VG	Vergasung
VKB	Vorklärbecken
XTS	Anorganische Anteil an abfiltrierbaren Stoffen
ZPW	Zulaufpumpwerk

### ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1-1: Beispiel einer vertikalen Struktur des Elektrizitätsnetzes [7] .....	2
Abbildung 1-2: Beispiel einer elektrischen Netzstruktur mit gegenläufigen Lastflüssen durch die Integration erneuerbarer Energieversorgungseinheiten [7] .....	2
Abbildung 1-3: Flexibilitätsverhalten flexibler a) Energieaufbringungseinheiten und b) Lasten einer kommunalen Abwasserreinigungsanlage – eigene Darstellung nach [15].....	3
Abbildung 2-1: Fließschema eines einstufigen Belebtschlammverfahrens mit Durchlaufbetrieb [21].	10
Abbildung 2-2: Grafische Gegenüberstellung der Kernkomponenten des simultanen aeroben und des mesophilen anaeroben Schlammstabilisierungsverfahrens bei kommunalen ARAs mit Belebtschlammverfahren – eigene Darstellung nach [21] .....	10
Abbildung 2-3: Vereinfachtes Fließschema einer Belebungsanlage mit anaerober Schlammstabilisierung inklusive der bei der Reinigung anfallenden Rückstände und deren Behandlungs- und Verwertungspfade – eigene Darstellung nach [28].....	12
Abbildung 2-4: Spezifischer Elektrizitätsbedarf von 5.281 deutschen ARAs nach Größenklassen– angepasste Darstellung nach [18].....	20
Abbildung 2-5: Spezifische dezentrale Aufbringung elektrischer Energie von 895 deutschen ARAs mit Faulgasnutzung nach Größenklassen – angepasste Darstellung nach [18].....	23
Abbildung 2-6: Elektrischer Energieautarkiegrad von 890 deutschen ARAs mit Faulgasnutzung nach Größenklassen – angepasste Darstellung nach [18] .....	24
Abbildung 3-1: Kategorisierung der Flexibilitätsoptionen im elektrischen Netz – eigene Darstellung nach [11].....	29
Abbildung 3-2: Optionen zur Bereitstellung positiver und negativer Flexibilität mittels kommunaler ARAs .....	31
Abbildung 3-3: Spezifisches Faulraumvolumen kommunaler ARAs in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz nach Größenklassen [11].....	35
Abbildung 3-4: Spezifisches Gasspeichervolumen kommunaler ARAs in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz nach Größenklassen [11].....	36
Abbildung 5-1: Systemgrenzen und Module der Systeme „kommunale ARA“ und „Energieverbund“ als Basis für die stationären Massen- und Energiebilanzmodelle in OPTIEVLEX .....	49
Abbildung 5-2: Modellierungsschritte zum Aufbau der Application Software OPTIEVLEX.....	51
Abbildung 5-3: Überblick zu den Teilmodellen von OPTIEVLEX inkl. der möglichen Nutzerspezifikationen, der verbindenden Datenschleifen, sowie der potenziellen Ergebnisse und Anwendungsoptionen .....	53
Abbildung 5-4: Exemplarischer elektrischer Leistungs- und Energiebedarf einer kommunalen ARA, sowie exemplarische ARA-intern aufgebrauchte elektrische Leistung und Energiemenge.....	56
Abbildung 5-5: Systemgrenze und Module des Systems „kommunale ARA“ als Basis für das stationäre Massen- und Energiebilanzmodell in OPTIEVLEX .....	62

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 5-6: Massen- und Energiebilanz je Modul.....	65
Abbildung 5-7: Schlamm-dichten in Abhängigkeit des Trockengehaltes und des Glühverlustes – eigene Darstellung nach [112] .....	66
Abbildung 5-8: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Zulaufpumpwerk“ .....	67
Abbildung 5-9: Reibungsbeiwert $\lambda$ für Bingham-Fluide nach Reynolds- und Hedström-Zahl [24] .....	70
Abbildung 5-10: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Rechenanlage“ .....	70
Abbildung 5-11: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Sand- und Fettfang“ .....	72
Abbildung 5-12: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Vorklärbecken“ .....	74
Abbildung 5-13: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Belebungsbecken“.....	75
Abbildung 5-14: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Phosphorelimination“ .....	78
Abbildung 5-15: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Nachklärbecken“ .....	79
Abbildung 5-16: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Voreindicker“ .....	80
Abbildung 5-17: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Eindicker“ .....	80
Abbildung 5-18: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Faulturm“ .....	82
Abbildung 5-19: CSB-Abbaugrad im Modul „Faulturm“ in Abhängigkeit der Aufenthaltsdauer im Vorklärbecken und des NS-Schlammalters – eigene Darstellung nach [123] .....	83
Abbildung 5-20: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Entwässerung“ .....	84
Abbildung 5-21: Systemgrenzen und Module des erweiterten Systems „Energieverbund“ für das stationäre Massen- und Energiebilanzmodell in OPTIEVLEX.....	85
Abbildung 5-22: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Faulgasnutzung“.....	86
Abbildung 5-23: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Trockner“ .....	90
Abbildung 5-24: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Klärschlammnutzung“ .....	91
Abbildung 5-25: Ermittlung von Schlammgruppen anhand des Asche- und Kohlenstoffgehaltes .....	92
Abbildung 5-26: Verfahrensschema des BHKW-Moduls der Kopf SynGas GmbH & Co. KG zur thermischen Klärschlammverwertung [65].....	96
Abbildung 5-27: Aspen Plus Simulationsmodell des BHKW-Moduls der Kopf SynGas GmbH & Co. KG zur thermischen Klärschlammvergasung.....	97
Abbildung 5-28: Aufbau und Ablaufschema zum Steady-State-Teilmodell 1 .....	100
Abbildung 5-29: Exemplarische Trockenwetter-Tagesprofile des Zulaufvolumenstromes und der Zulaufkonzentrationen einer kommunalen ARA der GK 5 (rund 100.000 EW) – Primärachse: Trockenwetterzulauf und CSB-Konzentration; Sekundärachse: TKN- und TP-Konzentration .....	101
Abbildung 5-30: Exemplarisches Flexibilitätsband für einen Energieverbund der GK 5 (100.001 EW) .....	108
Abbildung 5-31: Systemgrenzen für die netzdienlichen Szenarien im Steady-State-Teilmodell 2.....	109
Abbildung 5-32: Systemgrenzen für die systemdienlichen Szenarien im Steady-State-Teilmodell 2 ..	110
Abbildung 5-33: Aufbau und Ablaufschema zum Steady-State-Teilmodell 2 .....	111

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 5-34: Jahresbedarfsprofil an netzdienlicher elektrischer Flexibilität in OPTIEVLEX – Elektrisches Residuallastprofil eines Quartiers einer mittelgroßen Stadt mit 900 durchschnittlichen 3-Personen-Haushalten im Jahr 2030 mit 25%iger Ausnutzung des theoretischen Photovoltaik-Potentials .....	113
Abbildung 5-35: Positive und negative für die Regelzone APG abgerufene elektrische a) Sekundär- und b) Tertiärregelenergiemenge von AT- Anbietern der Jahre 2014-2018 – eigene Darstellung nach [109].....	113
Abbildung 5-36: Mit OPTIEVLEX untersuchbare-Szenarien zur netz- und systemdienlichen Flexibilisierung von Energieverbunden kommunaler ARAs.....	115
Abbildung 5-37: Validierungsergebnisse zum System „kommunale ARA“ – Relative Abweichungen der trockenen Nutzschlammströme und Faulgasnormvolumenströme der ARAs 1 – 7 122	
Abbildung 5-38: Validierungsergebnisse zum System „kommunale ARA“ – Spezifischer Elektrizitätsbedarf nach Reinigungs- und Schlammbehandlungsstufen der ARAs 1 – 7.....	123
Abbildung 5-39: Validierungsergebnisse zum System „Energieverbund“ – Relative Abweichung der Elektrizitäts- und Wärmeaufbringung und des Faulgasnormvolumenstromes des Moduls „Faulgasnutzung“ .....	125
Abbildung 5-40: Validierungsergebnisse zum System „Energieverbund“ – Relative Abweichung des Elektrizitäts- und Wärmebedarfs des Moduls „Trockner“ .....	126
Abbildung 5-41: Validierungsergebnisse zum System „Energieverbund“ – Relative Abweichung des Luft-, Produktgas- und Aschemassenstromes des Moduls „Klärschlammnutzung“ .....	127
Abbildung 5-42: Validierungsergebnisse zum System „Energieverbund“ – Relative Abweichung des Produktgasheizwertes des Moduls „Klärschlammnutzung“ .....	128
Abbildung 5-43: Validierungsergebnisse zum System „Energieverbund“ – Relative Abweichung der Elektrizitäts- und Wärmeaufbringung des Moduls „Klärschlammnutzung“ .....	129
Abbildung 6-1: Übersicht über die Analysen mit OPTIEVLEX.....	130
Abbildung 6-2: Elektrischer Energieautarkiegrad ( $EAG_{el}$ ) nach EW der Energieverbunde anARA_BHKW/MGT/HK .....	135
Abbildung 6-3: Spezifischer elektrischer und thermischer Energiebedarf ausgewählter Trockneraggregate.....	136
Abbildung 6-4: Elektrischer und thermischer EAG der Energieverbunde der GK5 (100.001 EW).....	137
Abbildung 6-5: Elektrischer EAG der mit OPTIEVLEX analysierten Energieverbunde und Größenklassen .....	139
Abbildung 6-6: Mittlere elektrische Trockenwetter-Tageslast- und -aufbringungsprofile der ausgewählten Energieverbunde „anARA_BHKW“, „anARA_BHKW_T“ und „anARA_BHKW_T_VG-BHKW“.....	141
Abbildung 6-7: Theoretisches elektrisches Flexibilitätspotential – Zeitlich aufgelöste Flexibilitätsbänder der ausgewählten Energieverbunde „anARA_BHKW“, „anARA_BHKW_T“ und „anARA_BHKW_T_VG-BHKW“.....	143

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 6-8: Mit OPTIEVLEX untersuchte netz- und systemdienliche Szenarien nach den ausgewählten Energieverbunden „anARA_BHKW“, „anARA_BHKW_T“ und „anARA_BHKW_T_VG-BHKW“ .....	145
Abbildung 6-9: Systemgrenzen für die netzdienlichen Szenarien in Analyse 3.....	146
Abbildung 6-10: Jahresregenzulaufprofil für die mit OPTIEVLEX durchgeführten Analysen 3 und 4..	148
Abbildung 6-11: Gegenüberstellung ausgewählter Tagesprofile nach Saisonen der Residuallasten der Stadtgebiete 2 – 6 (Zelle 2) mit den Flexibilitätsbändern der Energieverbunde „anARA_BHKW“, „anARA_BHKW_T“ und „anARA_BHKW_T_VG-BHKW“ (Zelle 1).....	149
Abbildung 6-12: Referenzszenario nach OPTIEVLEX – Mittlere elektrische Tageslast- und -aufbringungsprofile des Energieverbundes „anARA_BHKW_T_VG-BHKW“ nach Saisonen .....	153
Abbildung 6-13: Referenzszenario (RS) nach OPTIEVLEX – Kostenkennzahlen der ausgewählten Energieverbunde „anARA_BHKW“, „anARA_BHKW_T“ und „anARA_BHKW_T_VG-BHKW“ .....	155
Abbildung 6-14: Netzdienliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Jährliche realisierbare positive und negative elektrische Energiemenge der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Szenario (S) im Vergleich zum jährlichen Flexibilitätsbedarf der Zelle 2 „Quartier“ .....	157
Abbildung 6-15: Netzdienliches Szenario 2 nach OPTIEVLEX – a) Residuallast der Zelle 2 „Quartier“, b) Betriebsführung des Faulgas (FG)-BHKWs und c) Faulgasspeicherfüllstand bei Durchführung der FS1, sowie d) Betriebsführung des FG-BHKWs und e) Faulgasspeicherfüllstand bei Durchführung der FS2 für zwei exemplarische Sommerwochen für den Energieverbund „anARA_BHKW“ (Zelle 1).....	161
Abbildung 6-16: Netzdienliches Szenario 2 nach OPTIEVLEX – a) Regenwetterzulauf Zelle 1, b) Residuallast der Zelle 2 nach Abruf des Faulgas (FG)-BHKWs und c) Betriebsführung der Belüftung bei Durchführung der FS1, sowie d) Residuallast der Zelle 2 nach Abruf des FG-BHKWs und e) Betriebsführung der Belüftung bei Durchführung der FS2 für zwei exemplarische Sommerwochen für den Energieverbund „anARA_BHKW“ (Zelle 1) .....	164
Abbildung 6-17: Netzdienliches Szenario 2 nach OPTIEVLEX – Jahresdauerlinien der Residuallasten der Zelle 2 vor und nach den ausgleichenden Abrufen von Flexibilität des Energieverbundes „anARA_BHKW“ (Zelle 1).....	165
Abbildung 6-18: Netzdienliches Szenario 4 nach OPTIEVLEX – a) Residuallast der Zelle 2 nach Abruf des Faulgas (FG)-BHKWs, b) Betriebsführung des Produktgas (PG)-BHKWs und c) Produktgasspeicherfüllstand bei Durchführung der FS1, d) Residuallast der Zelle 2 nach Abruf des Faulgas-BHKWs sowie e) Betriebsführung des Produktgas-BHKWs und f) Produktgasspeicherfüllstand bei Durchführung der FS2 für zwei exemplarische Sommerwochen für den Energieverbund „anARA_BHKW_T_VG-BHKW“ (Zelle 1) .....	167



## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 6-19: Netzdienstliches Szenario 4 nach OPTIEVLEX – Jahresdauerlinien der Residuallasten der Zelle 2 vor und nach den ausgleichenden Abrufen von Flexibilität des Energieverbundes „anARA_BHKW_T_VG-BHKW“ (Zelle 1) .....	169
Abbildung 6-20: Netzdienstliches Szenario 6 nach OPTIEVLEX – a) Residuallast der Zelle 2 nach Abruf des Faulgas (FG)-BHKWs, b) Betriebsführung des Produktgas (PG)-BHKWs und c) Produktgasspeicherfüllstand bei Durchführung der FS1 für zwei exemplarische Winterwochen, d) Residuallast der Zelle 2 nach Abruf des Faulgas-BHKWs sowie e) Betriebsführung des Produktgas-BHKWs und f) Produktgasspeicherfüllstand bei Durchführung der FS2 für zwei exemplarische Sommerwochen für den Energieverbund „anARA_BHKW_T_VG-BHKW“ (Zelle 1) .....	171
Abbildung 6-21: Netzdienstliches Szenario 6 nach OPTIEVLEX – Jahresdauerlinien der Residuallasten der Zelle 2 vor und nach den ausgleichenden Abrufen von Flexibilität des Energieverbundes „anARA_BHKW_T_VG-BHKW“ (Zelle 1) .....	172
Abbildung 6-22: Netzdienstliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Energiekennzahlen der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario (RS).....	172
Abbildung 6-23: Netzdienstliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Energiekennzahlen der Erneuerbaren Energiegemeinschaft „Energieverbund (Zelle 1) – Quartier (Zelle 2)“ nach Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario (RS) .....	174
Abbildung 6-24: Netzdienstliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Kostenkennzahlen der Erneuerbaren-Energiegemeinschaft „anARA_BHKW (Zelle 1) – Quartier (Zelle 2)“ nach Bereitstellung von Flexibilität durch die Zelle 1 je Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS) .....	176
Abbildung 6-25: Netzdienstliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Kostenkennzahlen der Erneuerbaren-Energiegemeinschaft „anARA_BHKW_T (Zelle 1) – Quartier (Zelle 2)“ nach Bereitstellung von Flexibilität durch die Zelle 1 je Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS) .....	178
Abbildung 6-26: Netzdienstliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Kostenkennzahlen der Erneuerbaren-Energiegemeinschaft „anARA_BHKW_T_VG-BHKW (Zelle 1) – Quartier (Zelle 2)“ nach Bereitstellung von Flexibilität durch die Zelle 1 je Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS) .....	178
Abbildung 6-27: Systemdienstliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Jährliche realisierbare positive und negative elektrische Energiemenge der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Szenario (S).....	181
Abbildung 6-28: Systemdienstliches Szenario 8 nach OPTIEVLEX – a) Bedarfsprofil zur Sekundärregelleistung der Zelle 2, b) Betriebsführung des Faulgas-BHKWs und c) Faulgasspeicherfüllstand, d) Abrufsignal zur Sekundärregelleistung nach Abruf des Faulgas-BHKWs, e) Betriebsführung des Produktgas-BHKWs und f) Produktgasspeicherfüllstand bei Durchführung der FS2 für zwei exemplarische Sommerwochen für den Energieverbund „anARA_BHKW_T_VG-BHKW“ (Zelle 1) .....	184

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 6-29: Systemdienliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Energiekennzahlen der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario (RS).....	186
Abbildung 6-30: Systemdienliche Szenarien nach OPTIEVLEX - Kostenkennzahlen der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario (RS).....	188
Abbildung 10-1: Produktgaszusammensetzung der Schlammgruppen a) „Aerob - Gruppe 1“ und b) „Aerob - Gruppe 2“ gemäß Aspen Plus Simulationsmodell - Primärachse: CO-, CO <sub>2</sub> - und N <sub>2</sub> -Anteil; Sekundärachse: CH <sub>4</sub> -, N <sub>2</sub> -, H <sub>2</sub> O- und H <sub>2</sub> S-Anteil.....	234
Abbildung 10-2: Produktgaszusammensetzung der Schlammgruppen a) „Anaerob – Gruppe 1“, b) „Anaerob – Gruppe 2“ und c) „Anaerob – Gruppe 3“ gemäß Aspen Plus Simulationsmodell - Primärachse: CO-, CO <sub>2</sub> - und N <sub>2</sub> -Anteil; Sekundärachse: CH <sub>4</sub> -, N <sub>2</sub> -, H <sub>2</sub> O- und H <sub>2</sub> S-Anteil.....	234
Abbildung 10-3: Spezifischer mittlerer Produktgasmassenstrom nach Schlammgruppen gemäß Aspen Plus Simulationsmodell .....	235
Abbildung 10-4: Spezifischer mittlerer Aschemassenstrom nach Schlammgruppen gemäß Aspen Plus Simulationsmodell .....	235

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Größenklassen kommunaler Abwasserreinigungsanlagen nach EW gemäß DWA .....	9
Tabelle 2-2: Verfahrenskonzepte zur dezentralen thermischen Verwertung von Klärschlamm (2020) .....	19
Tabelle 2-3: Median des spezifischen Elektrizitätsbedarfes nach Größenklassen und zugehörige abgeschätzte Volllaststunden von Aggregaten kommunaler Abwasserreinigungsanlagen...	21
Tabelle 3-1: Flexible Aggregate und deren Abschaltdauer nach Literaturstellen – erweitert und angepasst nach Schäfer [92].....	32
Tabelle 3-2: Realisierbares positives und negatives spezifisches elektrisches Flexibilitätspotential bei kommunalen ARAs der GK4 nach Literaturstellen.....	38
Tabelle 3-3: Bundesweites realisierbares positives und negatives spezifisches elektrisches Flexibilitätspotential nach Literaturstellen.....	39
Tabelle 3-4: Mögliche Auswirkungen auf die Abwasserreinigungs-, Schlammbehandlungs- und Energieversorgungsprozesse einer kommunalen ARA durch die Flexibilisierung von flexiblen Lasten und Energieaufbringungseinheiten – angepasste Aufzählung nach [11, 92] .....	40
Tabelle 5-1: Investitionskosten bei Anlagenerweiterung bzw. -anpassung zur Bereitstellung von Flexibilität .....	60
Tabelle 5-2: Literaturwerte zu Abwasseranfall und -zusammensetzung.....	65
Tabelle 5-3: Mittlere Immediat- und Elementarzusammensetzung der fünf Schlammgruppen .....	93
Tabelle 5-4: Parameter zur Ermittlung des Abflussbeiwertes.....	103
Tabelle 5-5: Luft- und Belebungsbeckentemperaturen in OPTIEVLEX nach Jahreszeiten .....	105
Tabelle 5-6: Kriterien zur Auswahl der in OPTIEVLEX berücksichtigten flexiblen Aggregate.....	107
Tabelle 5-7: Auswahloptionen zu den maximalen Abschalt Dauern inkl. zugehöriger Regenerationszeiten der flexiblen Lasten in OPTIEVLEX.....	114
Tabelle 5-8: Übersicht zu den Validierungsschritten für OPTIEVLEX.....	119
Tabelle 5-9: Charakteristika der zur Validierung der stationären Massen- und Energiebilanzierung des Systems „kommunale ARA“ herangezogenen Kläranlagen ARA 1 – 7.....	121
Tabelle 6-1: Mittels OPTIEVLEX untersuchte Energieverbunde zur Ermittlung des jeweiligen thermischen und elektrischen Energieautarkiegrads .....	132
Tabelle 6-2: Definition der Nutzerspezifikationen des Systems „kommunale ARA“ für die mit OPTIEVLEX durchgeführten Analysen.....	133
Tabelle 6-3: Spezifikation des Betriebsverhaltens energieintensiver Aggregate für die mit OPTIEVLEX durchgeführten Analysen.....	141
Tabelle 6-4: Theoretisches elektrisches Flexibilitätspotential – Minimale, maximale und durchschnittliche positive und negative flexible Leistung gemäß Flexibilitätsband nach Aggregaten und Energieverbunden .....	144

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 6-5: Definition der Nutzerspezifikationen des Blocks „Flexibilitätseinsatzmodells“ für die mit OPTIEVLEX durchgeführten Analysen .....	151
Tabelle 6-6: Referenzszenario nach OPTIEVLEX – Energiekennzahlen der ausgewählten Energieverbunde „anARA_BHKW“, „anARA_BHKW_T“ und „anARA_BHKW_T_VG-BHKW“ .....	153
Tabelle 6-7: Referenzszenario nach OPTIEVLEX – Energie- und Kostenkennzahlen der Zelle 2 „Quartier“ .....	156
Tabelle 6-8: Netzdienliches Szenario 2 nach OPTIEVLEX – Anzahl der 15 min-Abrufe in einem Jahr je flexiblem Aggregat der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Flexibilisierungsstrategie (FS) .....	160
Tabelle 6-9: Netzdienliches Szenario 4 nach OPTIEVLEX – Anzahl der 15 min-Abrufe in einem Jahr je flexiblem Aggregat der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Flexibilisierungsstrategie (FS) .....	166
Tabelle 6-10: Netzdienliches Szenario 6 nach OPTIEVLEX – Anzahl der 15 min-Abrufe je flexiblem Aggregat der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Flexibilisierungsstrategie (FS) .....	170
Tabelle 6-11: Netzdienliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Strompreise und Einspeisetarife zur Berechnung der Kostenkennzahlen für die Erneuerbaren-Energiegemeinschaften (EEG) „Energieverbund-Quartier“ .....	176
Tabelle 6-12: Systemdienliches Szenario 8 nach OPTIEVLEX – Anzahl der 15 min-Abrufe je flexiblem Aggregat der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Flexibilisierungsstrategie (FS) .....	183
Tabelle 10-1: Aggregatspezifische Flexibilitätsparameter nach Schäfer [92] .....	215
Tabelle 10-2: Bewertung der Beeinflussung und Nutzbarkeit flexibler Aggregate bei Regenwetterzufluss nach Schäfer [92].....	216
Tabelle 10-3: Strompreis für Nicht-Haushaltskunden in Österreich im Jahr 2019 [102] .....	217
Tabelle 10-4: Gaspreis für Nicht-Haushaltskunden in Österreich im Jahr 2019 [103].....	217
Tabelle 10-5: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Zulaufpumpwerk“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB).....	218
Tabelle 10-6: Gesamtwirkungsgrad der im Modul „Zulaufpumpwerk“ auswählbaren Pumpenarten	218
Tabelle 10-7: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Zulaufpumpwerk“ .....	218
Tabelle 10-8: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Rechenanlage“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB).....	219
Tabelle 10-9: Spezifischer Rechengutvolumenstrom und Elektrizitätsverbrauch im Modul „Rechenanlage“ .....	219
Tabelle 10-10: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Rechenanlage“ .....	219
Tabelle 10-11: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Sand- und Fettfang“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB) .....	220
Tabelle 10-12: Spezifischer Sand- und Fettvolumenstrom, sowie spezifische Leistung der Sandfangräumer und spezifischer Elektrizitätsverbrauch der Sandwaschanlage zur Ermittlung der Massen- und Energieströme im Modul „Sand- und Fettfang“ .....	220

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 10-13: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Sand- und Fettfang“ .....	221
Tabelle 10-14: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Vorklärbecken“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB).....	221
Tabelle 10-15: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Vorklärbecken“ .....	221
Tabelle 10-16: Abtrenngrade im Vorklärbecken nach Aufenthaltszeit gemäß Arbeitsblatt DWA-A 131 [74].....	222
Tabelle 10-17: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Belebungsbecken“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB).....	222
Tabelle 10-18: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Belebungsbecken“ .....	223
Tabelle 10-19: Spezifischer Elektrizitätsbedarf der Umwälzung im Modul „Belebungsbecken“ .....	223
Tabelle 10-20: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Phosphorelimination“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB) .....	224
Tabelle 10-21: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Nachklärbecken“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB).....	224
Tabelle 10-22: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Voreindicker“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB).....	225
Tabelle 10-23: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Eindicker“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB).....	226
Tabelle 10-24: Literaturwerte zu der Trockensubstanz (TS), dem organischen TS-Anteil, sowie der CSB-, TP- und TN-Konzentration von Co-Substraten im Modul „Voreindicker“ [122] .....	226
Tabelle 10-25: Literaturwerte zu dem erreichbaren Trockengehalt, sowie dem spezifischen Elektrizitäts- und Flockungshilfsmittelbedarf der Module „Voreindicker“ und „Eindicker“ [30] .....	227
Tabelle 10-26: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Faulturm“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB).....	227
Tabelle 10-27: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Faulturm“ .....	228
Tabelle 10-28: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Entwässerung“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB).....	228
Tabelle 10-29: Literaturwerte zu dem erreichbaren Trockengehalt, sowie dem spezifischen Elektrizitätsbedarf des Moduls „Entwässerung“ [17, 31] .....	229
Tabelle 10-30: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Faulgasnutzung“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB).....	229
Tabelle 10-31: Elektrischer und thermischer FG-BHKW-Wirkungsgrad nach elektrischer Nennleistung [17].....	230
Tabelle 10-32: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Faulgasnutzung“ .....	230
Tabelle 10-33: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Trockner“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB).....	231

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 10-34: Literaturwerte zu dem erreichbaren Trockengehalt, sowie dem Anteil an rückführbarer Abwärme am Wärmebedarf im Modul „Trockner“ .....	231
Tabelle 10-35: Literaturwerte zu dem spezifischen Elektrizitäts- und Wärmebedarf im Modul „Trockner“ [69] .....	232
Tabelle 10-36: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Klärschlammnutzung“ .....	232
Tabelle 10-37: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Klärschlammnutzung“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB) .....	233
Tabelle 10-38: Elektrischer und thermischer PG-BHKW-Wirkungsgrad nach elektrischer Nennleistung [17] .....	233
Tabelle 10-39: Optionen zur Nutzerspezifikation der Betriebszeiten energieintensiver Aggregate kommunaler ARAs .....	236
Tabelle 10-40: Anteil der Zellen 2 – 6 am städtischen Elektrizitätsbedarf und an der städtischen elektrischen Residuallast [139] .....	237
Tabelle 10-41: Struktur der Zellen 2 – 6 nach Standardlastprofilen [139] .....	237

# 1 EINLEITUNG

Die verstärkte Einbindung erneuerbarer Energieträger in die Energieversorgungsstruktur stellt eine wichtige Komponente in der Klima- und Energiepolitik der EU und von Österreich dar. EU-weit gilt die verbindliche Zielvorgabe für 2030 den Anteil erneuerbarer Energie am Bruttoendenergieverbrauch (BEEV) auf mindestens 32 % zu erhöhen. Zudem erlaubt eine Überprüfungs Klausel, die Zielvorgabe im Jahr 2023 noch weiter anzuheben. [1] Eine Aktualisierung nationaler Zielvorgaben der EU-Mitgliedsstaaten ist aufgrund der angestrebten Treibhausgasneutralität im Jahr 2050 im Rahmen des Green Deals [2] 2023 zu erwarten. Die österreichische Energie- und Klimapolitik führte bereits 2018 zur Erreichung eines Anteils erneuerbarer Energie am BEEV von 33,5 %, wodurch im Rahmen der #mission2030 ein Anteil von mindestens 45 % im Jahr 2030 als Ziel veröffentlicht wurde. [3] Aufbauend auf regulatorischen Vorgaben der EU, sowie Maßnahmen der #mission2030, werden im Rahmen des Regierungsprogrammes 2020-2024 [4] und des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes [5] konkrete Ausbauziele der erneuerbaren Energieträger bis 2030 präsentiert. Für Strom aus erneuerbaren Energiequellen gilt: Bei einem gesamten Kapazitätsausbau von rund 27 TWh<sub>el</sub>, soll die Erzeugungskapazität bei Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) um 11 TWh<sub>el</sub>, bei Windanlagen um 10 TWh<sub>el</sub>, bei Wasserkraft um 5 TWh<sub>el</sub> und bei Biomasseanlagen um 1 TWh<sub>el</sub> erhöht werden. Des Weiteren wird bis 2030 das Ziel einer hundertprozentigen Deckung des Gesamtstromverbrauches (national bilanziell) mittels erneuerbarer Energiequellen verfolgt. Die Energiewende durch den Ausbau erneuerbarer Energiequellen rückt damit neben Suffizienz und Effizienz in den Fokus der Wissenschaft und Gesellschaft.

Die zur Umsetzung der Energiewende essenziellen Ausbauziele stützen sich vor allem auf die Kapazitätserhöhung der volatilen, erneuerbaren Elektrizitätsversorgung aus Photovoltaik- und Windanlagen. Die im Vergleich zur Aufbringung aus konventionellen Kraftwerken nur schwer planbare Einspeisung führt jedoch zu Veränderungen in der Elektrizitätsversorgung, welche mit besonderen Belastungssituationen des elektrischen Netzes verbunden sind. Die Versorgung der letzten Jahrzehnte ist gemäß Abbildung 1-1 vorwiegend durch zentrale Kraftwerke und einen Lastfluss von der höchsten hin zu niedrigeren Spannungsebenen bestimmt. Hier orientiert sich die Elektrizitätsversorgung vorwiegend an der nachgefragten Last. [6]

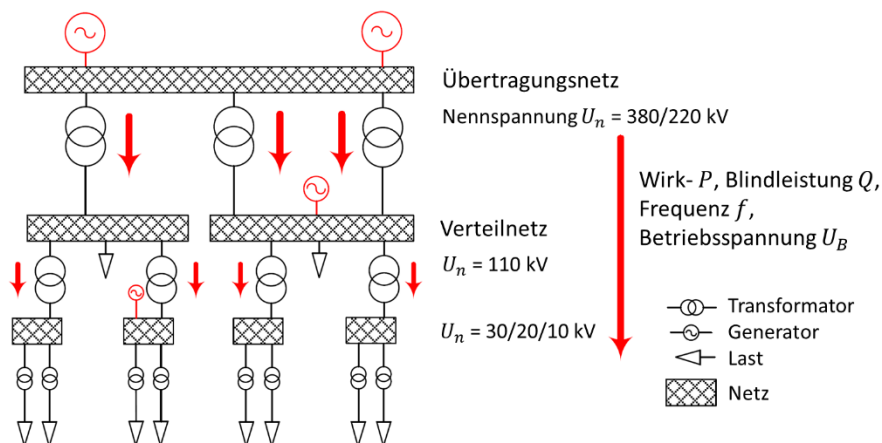


Abbildung 1-1: Beispiel einer vertikalen Struktur des Elektrizitätsnetzes [7]

Der zunehmende Anteil an volatilen, erneuerbaren Elektrizitätsquellen, welche auch dezentral in Nieder- und Mittelspannungsnetzen integriert sind, kann jedoch durch ein temporäreres Überangebot an Elektrizität gemäß Abbildung 1-2 gegenläufige Lastflüsse über alle Spannungsebenen hinweg verursachen. [6]

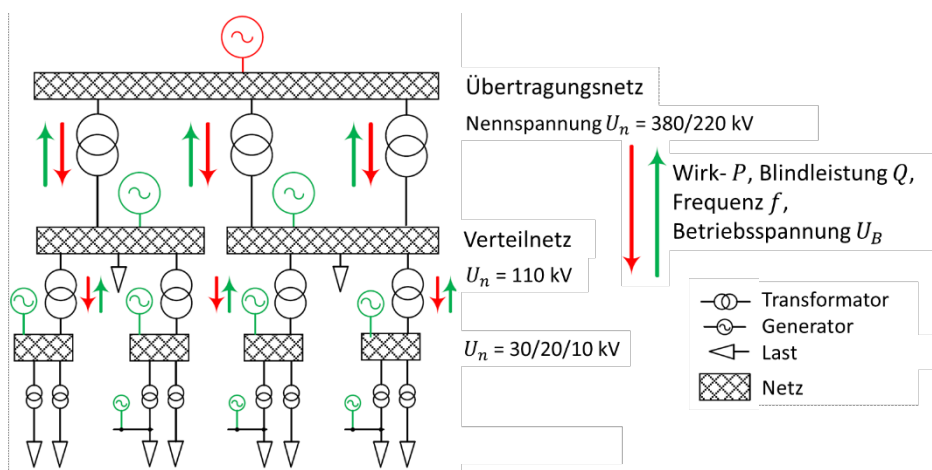


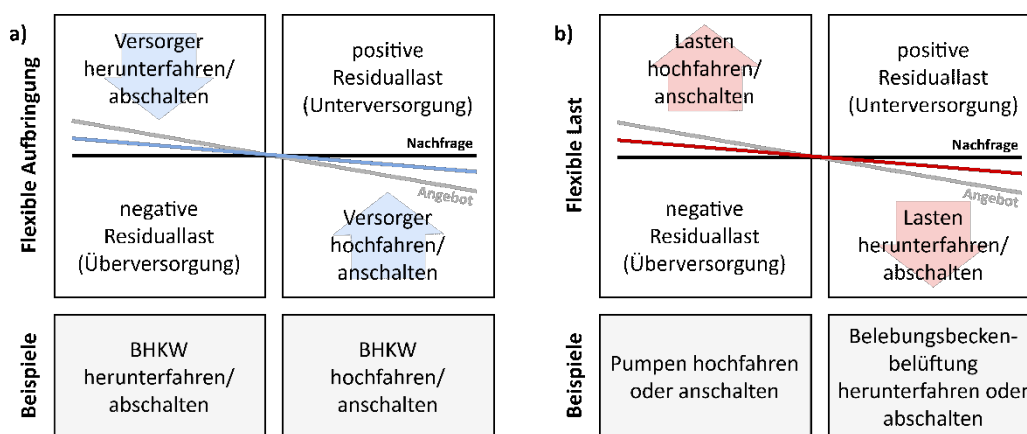
Abbildung 1-2: Beispiel einer elektrischen Netzstruktur mit gegenläufigen Lastflüssen durch die Integration erneuerbarer Energieversorgungseinheiten [7]

Zur Quantifizierung der neuen Belastungssituation kann die Residuallast herangezogen werden, welche sich aus der im abgegrenzten Betrachtungsgebiet nachgefragten Last abzüglich der volatilen erneuerbaren Energieaufbringung ergibt. [8] Bei Vorliegen einer positiven Residuallast, reicht im betrachteten Zeitraum die volatile erneuerbare Energieaufbringung nicht aus, um die nachgefragte Last zu decken. Liegt hingegen eine negative Residuallast vor, übersteigt das Angebot die Nachfrage. Da auch in Nieder- und Mittelspannungsnetzen ein kontinuierlicher Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage anzustreben ist, um Spannungsbandverletzungen (DIN EN 50160 [9]) und mögliche Leitungsüberlastungen minimal zu halten bzw. zu verhindern, ist bei einer Zunahme der volatilen erneuerbaren Einspeisung davon auszugehen, dass Flexibilitätsoptionen zur



Reduktion der Residuallast an Bedeutung gewinnen. Der Begriff Flexibilitätsoptionen beinhaltet dabei flexibel betreibbare Energieaufbringungseinheiten, Lasten und Speicher. Zu flexibel betreibbaren Energieaufbringungseinheiten, zählen unter anderem konventionelle Kraftwerke (z.B. Gas-und-Dampf-Kraftwerke), Pumpspeicherkraftwerke, sowie dezentrale Biomassekraftwerke, welche positive Flexibilität bereitstellen können. Flexible Lasten und Speicher ermöglichen den Ausgleich positiver, sowie negativer Residuallasten. Die Integration von Flexibilitätsoptionen ist in allen Spannungsebenen möglich und bietet vor allem kurzfristig eine Alternative zu baulichen Maßnahmen wie beispielsweise einem Netzausbau. Vor allem in der Nieder- und Mittelspannungsebene können lokal kritische Netzzustände durch dezentrale Flexibilitätsoptionen, die diverse Flexibilitätsoptionen anbieten, vermindert bzw. verhindert werden. [8, 10, 11] Die Bereitstellung und Vermarktung von Flexibilitätsoptionen gewinnt zudem durch die Möglichkeit an Energiegemeinschaften gemäß dem Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz [5] teilzunehmen an Attraktivität.

Betrachtet man die österreichweite dezentrale Anordnung der kommunalen Abwasserreinigungsanlagen (ARA), sowie deren energieintensive Reinigungsprozesse, die dezentrale (ARA-interne) Energieaufbringung und die meist vorhandenen Speichermöglichkeiten für Gas und Klärschlamm, wird deutlich, dass ARAs als dezentrale Flexibilitätsoptionen in Nieder- und Mittelspannungsnetzen dienen könnten. Dies bestätigen auch Studien zum Flexibilitätspotential von ARAs im deutschsprachigen Raum, welche in Abhängigkeit von der Residuallast diverse Flexibilitätsoptionen durch flexible Aufbringung und Lasten gemäß Abbildung 1-3 aufzeigen. [11–14]



**Abbildung 1-3: Flexibilitätverhalten flexibler a) Energieaufbringungseinheiten und b) Lasten einer kommunalen Abwasserreinigungsanlage – eigene Darstellung nach [15]**

Abbildung 1-3 zeigt, dass kommunale ARAs bei Erhöhung oder Reduktion der Energieaufbringung bzw. Last über Flexibilitätspotentiale verfügen, die z.B. zur Bereitstellung von netz- und systemdienlicher Flexibilität einsetzbar sind [11–14]. Um eine Einsatzplanung von Flexibilitäten im elektrischen Netz vornehmen zu können, sind Kenntnisse über zeitlich

aufgelöste Last- und Aufbringungsprofile, sowie zeitlich aufgelöste Flexibilitätspotentiale der jeweiligen ARA essenziell. Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist daher die Entwicklung einer Application Software, welche die Ermittlung der zeitlich aufgelösten Last- und Aufbringungsprofile und Flexibilitätspotentiale unterschiedlicher Anlagenkonfigurationen kommunaler ARAs ermöglicht. Auf Basis der zeitlich aufgelösten Potentiale, dient die Application Software zudem der Untersuchung des Flexibilitätseinsatzes in netz- und systemdienlichen Szenarien. Die Ergebnisse hinsichtlich des realisierbaren Flexibilitätspotentials, der dafür erforderlichen Gas- und Klärschlamm-speicherkapazitäten, und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Energie- sowie Kostencharakteristika, stellen die Basis für eine erste Beurteilung der Eignung von diversen ARA-Konfigurationen als Flexibilitätssdienstleister im elektrischen Netz dar. Zur Analyse der energietechnischen Charakteristika von diversen ARA-Konfigurationen, insbesondere zur Identifikation von Konfigurationen mit hohem elektrischen und thermischen Energieautarkiegraden, ermöglicht die Application Software vorab der zeitlich aufgelösten Flexibilitätsanalysen stationäre Analysen auf Basis einer Massen- und Energiebilanzierung. Zusätzlich findet die thermische Klärschlammverwertung im Tool Berücksichtigung, um zukünftige Trends in der Schlammbehandlung abzubilden und deren Einfluss auf die Leistungsprofile und Flexibilitätspotentiale zu untersuchen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen Anlagenbetreiber bei Investitionsentscheidungen unterstützen und Netzbetreiber, sowie Energieversorger auf mögliche Veränderungen der Leistungsprofile vorbereiten.

### 1.1 Aufbau der Dissertation

Am Beginn der vorliegenden Dissertation steht das **Kapitel 2 „Stand der Technik“**, welches den Einstieg in die Materie ermöglicht und der Definition des Begriffes „kommunale Abwasserreinigungsanlage“ dient. Die Untersuchung und Beschreibung des Aufbaus einer standardmäßigen kommunalen ARA und deren energietechnischen Charakteristika stellen zudem den technischen Hintergrund für die weiteren Analysen zur Flexibilisierung dar. Um aktuelle Entwicklungen bezüglich Reinigungs- und Schlammbehandlungsverfahren abzubilden, wird der Stand der Technik mit Erläuterungen zu dezentralen Klärschlamm-trocknungs- und verwertungsverfahren erweitert.

**Kapitel 3 „Stand der Forschung“** beinhaltet die Aufbereitung des aktuellen Forschungsstandes hinsichtlich der Kläranlagensimulation, und der Flexibilisierung im Allgemeinen, sowie im Kontext kommunaler ARAs. Vor allem Studien mit dem Ziel die Flexibilitätsoptionen und – potentiale kommunaler ARAs ganzheitlich zu ermitteln stehen hier im Fokus. Das Fazit dient der Zusammenfassung der Anforderungen, Herausforderungen, und Chancen einer Flexibilisierung.

Im **Kapitel 4 „Abgrenzung und Zielsetzung“** werden aus dem Kapitel 3 offene Forschungsfragen abgeleitet und auf deren Basis die Forschungsfrage der vorliegenden Dissertation definiert. In einem weiteren Schritt erfolgt zudem die Definition der Forschungsziele, welche bei Erreichung zur Beantwortung der Forschungsfrage führen. Dieser Aufbau wurde gewählt, da die Flexibilisierung kommunaler ARAs ein aktuelles Forschungsgebiet darstellt und ein vorangehender Einblick in die Thematik die Abgrenzung der Dissertation, sowie die Erfassung der Forschungsfrage und -ziele erleichtert.

Im Fokus von **Kapitel 5 „OPTIEVLEX – Aufbau und theoretischer Hintergrund“** steht der Aufbau, sowie der theoretische Hintergrund der im Rahmen der Dissertation entwickelten Application Software OPTIEVLEX. OPTIEVLEX dient einerseits, auf Basis einer stationären Massen- und Energiebilanzierung, der Untersuchung von Energieverbunden kommunaler ARAs (ARA inkl. Faulgas- und Klärschlammnutzung) mit einem Fokus auf der Identifikation von Anlagenkonfigurationen mit hohen elektrischen und thermischen Energieautarkiegraden (siehe Kapitel 5). Andererseits ermöglicht OPTIEVLEX, auf Basis eines Steady-State-Simulationsmodells zur Ermittlung zeitlich aufgelöster Flexibilitätspotentiale, Szenario-basierte Analysen zur Flexibilisierung kommunaler ARAs. Die Erläuterungen zu den Nutzerspezifikationen, Modellmodulen und Modellierungsschritten bilden die Grundlage der Application Software und sollen als Hilfe bei der Nutzung von OPTIEVLEX herangezogen werden können. Die Interpretation, der mit OPTIEVLEX ermittelten Resultate wird durch die Darlegung des theoretischen Hintergrundes und der zugehörigen Literaturwerte und Annahmen ermöglicht.

Die im Rahmen des Dissertationsvorhabens entwickelte Application Software OPTIEVLEX soll die Untersuchung der Flexibilitätspotentiale kommunaler ARAs gemäß dem Stand der Technik und Forschung im deutschsprachigen Raum ermöglichen. Daher steht in Kapitel 2 und 3 die Darstellung und Erläuterung von Literatur aus dem deutschsprachigen Raum im Fokus, welcher Ähnlichkeiten hinsichtlich der Struktur der jeweiligen Abwasserreinigungssektoren aufweist (siehe Kapitel 2 und 3). Besonders hervorgehoben, wird die österreichische Datengrundlage, da die im Zuge des Dissertationsvorhabens durchgeführten Analysen (siehe Kapitel 6) auf österreichischen Rahmenbedingungen hinsichtlich der Anlagenkonfigurationen, sowie des netz- und systemdienlichen Flexibilitätsbedarfes beruhen. Bei Bedarf wird der Stand der Technik und Forschung durch Erkenntnisse aus internationaler Literatur ergänzt. Für den in Kapitel 5 dargestellten theoretischen Hintergrund wird sowohl auf Literatur aus dem deutschsprachigen Raum als auch auf Berechnungsmethoden und Daten aus internationaler Literatur zurückgegriffen.

Die in **Kapitel 6 „Analysen mit OPTIEVLEX“** erläuterten Analysen und die damit verbundenen Resultate dienen der Beantwortung der in Kapitel 4 abgeleiteten offenen Forschungsfragen. Die Analysen basieren auf mittels der stationären Massen- und Energiebilanzierung identifizierten Energieverbunden mit hohen elektrischen Energieautarkiegraden, welche hinsichtlich ihres Flexibilitätspotentials im Rahmen von netz- und systemdienlichen Szenarien untersucht werden. Die dafür getroffenen Annahmen und vorgenommenen Nutzerspezifikationen werden detailliert erläutert. Zudem werden die Ergebnisse je Szenario dargestellt und diskutiert, um darauf basierend in **Kapitel 7 „Diskussion der Analysen und Schlussfolgerungen“** die Kernaussagen abzuleiten.

Das **Kapitel 8 „Ausblick“** beinhaltet eine kritische Betrachtung von OPTIEVLEX, um den zukünftigen Forschungsbedarf aufzuzeigen. Zudem wird auf die zukünftigen Einsatzmöglichkeiten von OPTIEVLEX hingewiesen.

## 1.2 Publikationsliste

Die im Rahmen des Dissertationsvorhabens veröffentlichten Konferenzbeiträge und Artikel in Fachzeitschriften finden sich im Inhalt der vorliegenden Monografie wieder. Die nachfolgenden Unterkapitel zeigen eine Einteilung der Publikationen nach Relevanz für den Inhalt der vorliegenden Dissertation.

### 1.2.1 Eng zugeordnete Publikationen

- Schopf, K & Kienberger, T 2018, Municipal waste water treatment systems and their future role in efficient and sustainable energy systems. in Proceedings International Sustainable Energy Conference 2018: ISEC 2018. Graz, S. 351-356. <http://t.aee-intec.at/0uploads/dateien1420.pdf>
- Butler, E & Schopf, K 2018, Improving the energetic self-sufficiency of waste water treatment plants: Tool for mass and energy balancing and needs-based configuration of the thermal sludge gasification process. in Waste Management: Volume 8 - Waste-to-Energy. Bd. 8, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, Deutschland, S. 443-457.
- Schopf, K, Judex, J, Schmid, B & Kienberger, T 2018, 'Modelling the bioenergy potential of municipal wastewater treatment plants', Water Science & Technology, Jg. 17, Nr. 11, S. 2613-2623. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.222>
- Schopf, K, Judex, J, Schmid, B & Kienberger, T 2017, Modelling the energy and nutrient potential of municipal wastewater treatment plants. in Proceedings of SludgeTech 2017. SludgeTech 2017, London, Großbritannien / Vereinigtes Königreich, 9/07/17 - 13/07/17.

- Schopf, K & Kienberger, T 2017, 'Abwasserreinigungsanlagen als Flexibilitätsoption innerhalb kommunaler Energienetze', Elektrotechnik und Informationstechnik: e & i. <https://doi.org/10.1007/s00502-017-0503-5>
- Schopf, K & Kienberger, T 2017, Modelling of the bioenergy potentials of municipal sewage plants. in Tagungsband zur 5. Mitteleuropäischen Biomassekonferenz. Austrian Biomass Association.
- Schopf, K, Schmid, B & Kienberger, T 2016, Energieverbunde kommunaler Kläranlagen. in Tagungsband zur 13. Recy & DepoTech-Konferenz. S. 821-824. Recy & Depo Tech 2016, Leoben, Österreich, 8/11/16 - 11/11/16.
- Schopf, K & Kienberger, T 2016, Energy networks of municipal sewage plants. in Proceedings iSEneC 2016. iSEneC 2016, Nürnberg, Deutschland, 11/07/16.

### **1.2.2 Zugeordnete, weitere Publikationen**

- Kienberger, T & Schopf, K 2016, Gasification of digestates and nutrient recycling. in Proceedings pre-basic Biogas Seminar. pre-basic Biogas Seminar, Malmö, Schweden, 8/11/16. [http://pre-basic.renewtec.se/resources/03\\_Thomas\\_Kienberger.pdf](http://pre-basic.renewtec.se/resources/03_Thomas_Kienberger.pdf)
- Kienberger, T & Schopf, K 2016, A review on thermal conversion of residues from anaerobic-digestion. in Conference Proceedings - 3rd International Conference on Renewable Energy Gas Technology. Jürgen Held, S. 13.

## 2 STAND DER TECHNIK

Um die Flexibilisierung von kommunalen ARAs untersuchen zu können, ist eine Analyse des Standes der Technik der Abwasserbehandlung erforderlich. Der Aufbau und die energietechnischen Charakteristika von ARAs, sowie aktuelle Entwicklungen bezüglich der energietechnischen Verwertung der regenerativen Energieträger Faulgas und Klärschlamm stehen hier im Vordergrund. Die im Rahmen des Dissertationsvorhabens entwickelte Application Software soll die Untersuchung der Flexibilitätspotentiale kommunaler ARAs gemäß dem Stand der Technik im deutschsprachigen Raum ermöglichen. Daher steht in Kapitel 2 die Darstellung und Erläuterung von Literatur aus dem deutschsprachigen Raum im Fokus. Besonders hervorgehoben, wird die österreichische Datengrundlage, da die im Zuge des Dissertationsvorhabens durchgeführten Analysen (siehe Kapitel 6) auf österreichischen Rahmenbedingungen hinsichtlich der Anlagenkonfigurationen, sowie des netz- und systemdienlichen Flexibilitätsbedarfes beruhen. Bei Bedarf wird der Stand der Technik durch Erkenntnisse aus internationaler Literatur ergänzt.

### 2.1 Kommunale ARA

Gemäß der kommunalen Abwasserrichtlinie 91/172/EWG [16] handelt es sich bei kommunalem Abwasser um „*häusliches Abwasser oder ein Gemisch aus häuslichem und Industriellem Abwasser und/oder Niederschlagswasser*“. Einrichtungen zur Behandlung von kommunalem Abwasser werden im Rahmen der vorliegenden Dissertation als kommunale ARA bezeichnet.

Die Größeneinteilung von kommunalen Kläranlagen erfolgt nach dem Einwohnerwert (EW), welcher ein Maß für die Ausbaupazität darstellt. Der EW lässt sich über die angeschlossene Einwohnerzahl (EZ) und den Einwohnergleichwert (EGW) gemäß der Formel berechnen. [17]

$$EW = EZ + EGW = EZ + \frac{B_{d,CSB,dM,gewerblich}}{B_{d,CSB,E}} \quad (2-1)$$

Die EZ beschreibt die Schmutzfracht, welche über häusliches Abwasser eingebracht wird. Der EGW ist ein Vergleichswert für die in gewerblichen Abwässern enthaltene Schmutzfracht. Zur Ermittlung des Einwohnergleichwertes wird der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) herangezogen. Hierzu wird die mittlere tägliche CSB-Fracht des gewerblichen Abwassers  $B_{d,CSB,dM,gewerblich}$  mit der täglichen CSB-Fracht pro Einwohner  $B_{d,CSB,E}$ , welche laut Definition der deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) 120 g beträgt, in Verhältnis gesetzt. [16, 17]

Im Kontext der Abwasserwirtschaft wird meist auf die Größeneinteilung gemäß DWA [18] verwiesen. Die Definition der fünf Größenklassen ist in Tabelle 2-1 dargestellt und wird für die Ausführungen der vorliegenden Dissertation übernommen.

**Tabelle 2-1: Größenklassen kommunaler Abwasserreinigungsanlagen nach EW gemäß DWA**

Größenklasse (GK)	Einwohnerwert (EW)
GK1	0 - 999
GK2	1.000 - 5.000
GK3	5.001 - 10.000
GK4	10.001 - 100.000
GK5	> 100.000

In Österreich existieren laut dem Branchenbild der österreichischen Abwasserwirtschaft 2020 [19], neben den Kleinkläranlagen (< 50 EW), 1.927 kommunale Kläranlagen mit einer Ausbaupazität größer 50 EW. Mit einem Anteil von 99 % an der gesamten Ausbaupazität reinigen diese Anlagen einen Großteil des anfallenden kommunalen Abwassers. Rund 93 % der Ausbaupazität entfallen dabei auf Anlagen der GK3 bis GK5.

## **2.2 Funktionsweise und Aufbau kommunaler ARAs**

In 92 % der in Österreich betriebenen kommunalen ARAs größer 500 EW kommt das Belebtschlammverfahren zum Einsatz. ARAs dieser Art werden nachfolgend als Belebungsanlagen bezeichnet. Von insgesamt 887 Kläranlagen > 500 EW sind rund 620 Belebungsanlagen mit aerober Schlammstabilisierung, sowie ca. 160 Belebungsanlagen mit Schlammfäulung (anaerober Stabilisierung) ausgestattet. Die restlichen Anlagen nutzen Verfahren wie das Tropf- oder das Tauchkörperverfahren. [19] Dieses Branchenbild zeigt sich im gesamten deutschsprachigen Raum. [20, 21] Aufgrund dieser Datenlage wird nachfolgend ein Fokus auf Belebungsanlagen mit aerober und anaerober Schlammstabilisierung gelegt. Hierzu folgt in den Kapiteln 2.2.1 bis 2.2.3 eine kurze Erläuterung des Belebtschlammverfahrens, eine Beleuchtung der aeroben und anaeroben Schlammstabilisierung in Zusammenhang mit dem Belebtschlammverfahren, sowie eine Beschreibung des gesamten Aufbaues einer Belebungsanlage.

### **2.2.1 Belebtschlammverfahren**

In Österreich überwiegt mit einem Anteil von ca. 70 % das einstufige Belebtschlammverfahren mit Durchlaufbetrieb (kontinuierlicher Betrieb). Sequencing-Batch-Reaktoren (diskontinuierlicher Betrieb), sowie mehrstufige Verfahrenskonzepte kommen in 30 % der kommunalen ARAs zum Einsatz. [19] Das kontinuierlich betriebene einstufige Belebtschlammverfahren ist in Deutschland und der Schweiz ebenfalls weit verbreitet [20, 21]

und wird daher genauer erläutert. Wie in Abbildung 2-1 ersichtlich, umfasst das Belebtschlammverfahren zwei Hauptkomponenten: das **belüftete Belebungsbecken**, sowie das **Nachklärbecken**. Im Belebungsbecken erfolgt mittels Luftertrag eine Sauerstoffanreicherung des Abwassers, was zu einem aeroben Abbau der Schmutzstoffe durch Mikroorganismen führt. Die sich dabei bildenden Belebtschlammflocken werden im Nachklärbecken durch Gravitation aussedimentiert, um entweder als Rücklaufschlamm (RLS) in das Belebungsbecken rückgeführt oder als Sekundärschlamm (SS; auch Überschussschlamm) ausgetragen zu werden. In speziellen Verfahrenskonzepten (vorgeschaltete Denitrifikation) kann zudem eine belebungsbeckeninterne Rezirkulation der Belebtschlammflocken erfolgen. Der dabei rückgeführte Belebtschlamm wird als Rezirkulationsschlamm (RZS) bezeichnet. [21]

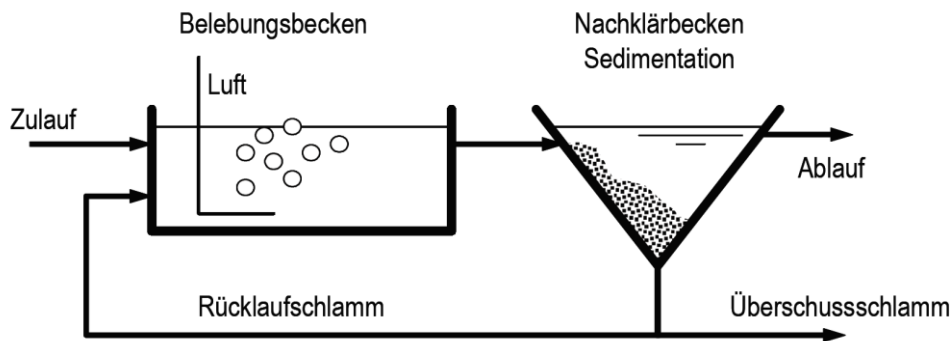


Abbildung 2-1: Fließschema eines einstufigen Belebtschlammverfahrens mit Durchlaufbetrieb [21]

### 2.2.2 Aerobe versus anaerobe Schlammstabilisierung

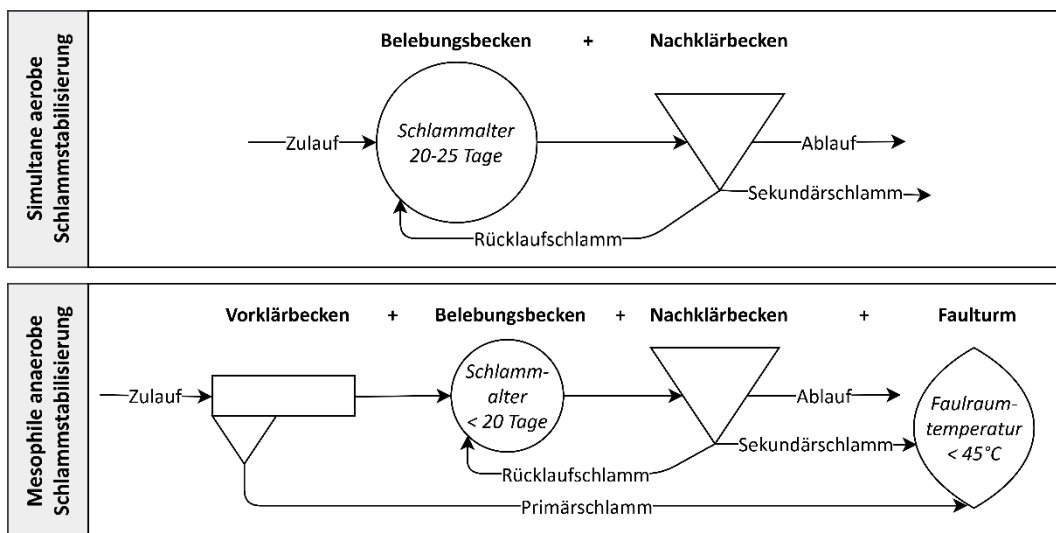


Abbildung 2-2: Grafische Gegenüberstellung der Kernkomponenten des simultanen aeroben und des mesophilen anaeroben Schlammstabilisierungsverfahrens bei kommunalen ARAs mit Belebtschlammverfahren – eigene Darstellung nach [21]

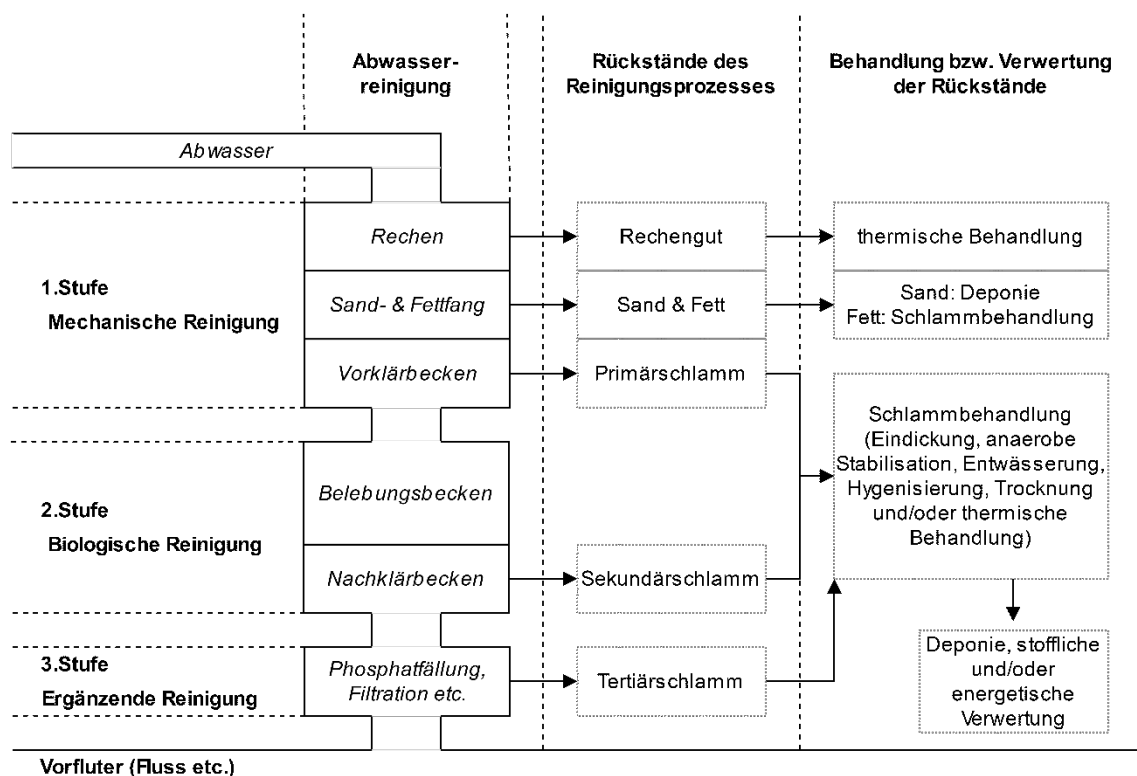


Wie bereits in der Einleitung des Kapitels 2.2 ersichtlich können Belebungsanlagen nach dem Verfahren der Schlammstabilisierung differenziert werden. Die im deutschsprachigen Raum am weitesten verbreiteten Verfahren sind die simultane aerobe sowie die mesophile anaerobe Schlammstabilisierung. [11, 19, 21, 22] In Österreich kommt bei 887 Kläranlagen größer 500 EW auf rund 420 Anlagen die simultane aerobe Stabilisierung ohne Vorklärung und auf rund 160 Anlagen die mesophile anaerobe Stabilisierung inklusive Vorklärung zum Einsatz [19]. Abbildung 2-2 dient der Gegenüberstellung der Kernkomponenten der beiden Stabilisierungsverfahren, anhand welcher die Unterschiede zwischen den Verfahren kurz erläutert werden.

Die simultane aerobe Stabilisierung findet im Belebungsbecken statt und ist durch ein hohes Schlammalter von 20 bis 25 Tagen gekennzeichnet. Wie in Abbildung 2-2 grafisch verdeutlicht, sind dementsprechend in Anlagen dieser Art Belebungsbecken mit großen Volumina und Langzeitbelüftung zu finden. Eine Vorklärung wird hier nicht vorgenommen, da eine separate Abtrennung von Primärschlamm nicht erforderlich ist. Die mesophile anaerobe Stabilisierung hingegen erfolgt in Faultürmen unter Ausschluss von Sauerstoff bei Temperaturen  $< 45^{\circ}\text{C}$  (Schlammfäulung). Dieses Verfahren führt zur Bildung von Faulgas, welches als regenerativer Energieträger zur Bereitstellung von Elektrizität und Wärme eingesetzt werden kann (siehe Kapitel 2.4.3). Eine separate Abtrennung von Primärschlamm im Vorklärbecken dient der Erhöhung der CSB-Konzentration im Faulturm was mit einer Steigerung des Faulgasanfalles verbunden ist. [21] Das Verfahren der Schlammfäulung ist hauptsächlich in Kläranlagen mit einer Ausbaupazität größer 20.000 EW integriert [19]. Aktuelle Untersuchungen zu Folge kann jedoch schon ab 10.000 EW ein wirtschaftlicher Betrieb erreicht werden, was sich in einem Trend zu Anlagen mit mesophiler Fäulung zeigt [19, 23]. Nähere Informationen zu den Verfahren sind in weiterführender Literatur ersichtlich. [21, 22, 24, 25]

### **2.2.3 Aufbau kommunaler ARAs mit Belebtschlammverfahren**

Gesamtheitlich betrachtet erfolgt die Reinigung des kommunalen Abwassers in Belebungsanlagen mittels einer Kombination aus mechanischen, biologischen und chemischen Verfahren, welche der Entfernung von Feststoffen, sowie organischen Verunreinigungen dienen. In einer Belebungsanlage gemäß dem Stand der Technik sind die Verfahren, wie in Abbildung 2-3 ersichtlich, drei Reinigungsstufen zugeordnet. Charakteristisch für Belebungsanlagen ist dabei die biologische Reinigungsstufe mit dem Belebungs- und Nachklärbecken, welche das Belebtschlammverfahren (siehe Kapitel 2.2.1) repräsentiert. [21, 26, 27] Abbildung 2-3 ermöglicht einen groben Überblick, während Abbildung 5-1 (siehe Kapitel 5) ein detaillierteres Fließschema einer Belebungsanlage mit anaerober Schlammstabilisierung zeigt.



**Abbildung 2-3: Vereinfachtes Fließschema einer Belebungsanlage mit anaerober Schlammstabilisierung inklusive der bei der Reinigung anfallenden Rückstände und deren Behandlungs- und Verwertungspfade – eigene Darstellung nach [28]**

### 2.2.3.1 Module der mechanischen Reinigung

Wie in Abbildung 2-3 ersichtlich wird das Abwasser zu Beginn einer **mechanischen Reinigung** zugeführt, welche Module zur mechanischen Vorreinigung umfasst. Die mechanische Vorreinigung dient der Entfernung von Grobstoffen, Sand und Fett in den sequenziell angeordneten Anlagen Rechen, sowie Sand- und Fettfang. Danach erfolgt bei Belebungsanlagen mit anaerober Schlammstabilisierung in der Vorklärung die Sedimentation der restlichen ungelösten Feststoffe. [21]

Die **Rechenanlage** und zusätzliche Siebe befinden sich meist direkt im Zulauf der ARA und ermöglichen die Abtrennung von Grobstoffen >5-20 mm. [21] Das dabei anfallende Rechengut wird maschinell entwässert und meist extern einer thermischen Behandlung zugeführt. [29]

Mineralische Stoffe mit hohen Sedimentationsgeschwindigkeiten und aufschwimmende Fette und Öle werden im vorwiegend kombinierten **Sand- und Fettfang** entfernt. Sandfänge werden häufig belüftet ausgeführt, um eine Anreicherung des Abwassers mit Sauerstoff zu erreichen. Dies kann zur Folge haben, dass erste gelöste organische Verbindungen biologisch abgebaut werden. Der anfallende Sand wird vorwiegend deponiert, während die Fette und Öle meist dem Klärschlamm vor der Schlammbehandlung beigefügt werden. [21, 26]

In Belebungsanlagen mit anaerober Schlammstabilisierung werden in einem zusätzlichen **Vorklärbecken** langsam sedimentierende Stoffe abgetrennt und als Primärschlamm (PS) ausgeleitet. Der PS wird der Schlammbehandlung inklusive einer Schlammfäulung zugeführt. [21, 26]

### 2.2.3.2 Module der biologischen Reinigung

Gemäß Abbildung 2-3 wird das mit biologisch abbaubaren, gelösten und noch nicht sedimentierten Schmutzstoffen beladene Abwasser nach der mechanischen Reinigung in die **biologische Reinigungsstufe** eingeleitet. Diese umfasst im Falle einer Belebungsanlage, wie in Kapitel 2.2.1 erläutert, ein **belüftetes Belebungsbecken** sowie ein **Nachklärbecken**. Je nach erforderlicher Reinigungsleistung und Verfahren zur Stickstoffelimination [16], können im Belebungsbecken mehrere Eliminationsprozesse erfolgen: [21, 24, 26]

- Biologische aerobe Kohlenstoffelimination: Abbau organischer Verbindungen
- Biologische Stickstoffelimination:
  - Nitrifikation: Mikrobiologische Oxidation von Ammonium  $\text{NH}_4^+$  über Nitrit  $\text{NO}_2^-$  zu Nitrat  $\text{NO}_3^-$
  - Denitrifikation: Mikrobiologische Reduktion von Nitrat  $\text{NO}_3^-$  zu Luftstickstoff  $\text{N}_2$
- Biologische Phosphatelimination mittels Polyphosphat akkumulierender Organismen

Kommunale ARAs nach dem Stand der Technik beinhalten eine biologische Kohlenstoff- und Stickstoffelimination mit Nitrifikation sowie Denitrifikation. Die biologische Phosphatelimination wird hingegen häufig mit einer chemischen Elimination unterstützt oder vollkommen durch diese ersetzt (siehe Kapitel 2.2.3.3). In Belebungsanlagen mit simultaner aerober Schlammstabilisierung wird im Belebungsbecken zudem die Stabilisierung des SS vorgenommen (siehe Kapitel 2.2.2). [19, 21]

### 2.2.3.3 Module der ergänzenden Reinigung

Die **ergänzende Reinigung** umfasst chemische und physikalische Verfahren. [21] Im Zuge der chemischen Verfahren werden Chemikalien eingesetzt, um die Flockenbildung von Feststoffen zu unterstützen (Flockung) und/oder um gelöste Salze in unlösliche Feststoffe zu überführen (Fällung). Oftmals können Flockungs- und Fällungsprozesse simultan ablaufen. Hier besonders hervorzuheben ist die chemische **Phosphatfällung** welche dem Stand der Technik im deutschsprachigen Raum zur Reduktion von Phosphorverbindungen entspricht. Die Phosphorelimination kann je nach Ort der Zudosierung als Vor- (Vorklärbecken), Simultan- (Belebungsbecken) oder Nachfällung (separates Modul nach Belebungsbecken) ausgeführt werden. Als Fällungschemikalien kommen vorwiegend Aluminium- und Eisensalze zum Einsatz. Die geflockten ungelösten Feststoffe werden anschließend z.B. mittels Sedimentation als Tertiärschlamm (TTS) entfernt. [21]

Ein weit verbreitetes ergänzendes physikalisches Reinigungsverfahren stellt die **Filtration** dar, welche der Entfernung von nach der mechanischen und biologischen Reinigung verbleibenden ungelösten Feststoffen dient. Ein vermehrt vorkommendes Verfahren auf großen Abwasserreinigungsanlagen ist die Flockungsfiltration. Hier wird eine Filtration in Zusammenhang mit der chemischen Phosphatfällung durchgeführt. [24, 26]

### 2.2.3.4 Schlammbehandlung

Wie in Abbildung 2-3 ersichtlich werden die Schlämme aus den diversen Reinigungsstufen (PS, SS und TTS) weiteren Verfahren zur Behandlung zugeführt. Bei einer Belebungsanlage mit aerober Schlammstabilisierung folgen volumenreduzierende Prozesse wie die Eindickung und die Entwässerung. Die Schlämme einer Belebungsanlage mit anaerober Stabilisierung werden zusätzlich einer Schlammfäulung unterzogen. Zudem kann eine Hygienisierung zur Elimination pathogener Keime erfolgen. [21, 26]

Die **Schlammeindickung** dient dem Wasserentzug und somit der Volumenreduktion. Partikuläre Stoffe werden mittels Sedimentation, Zentrifugieren oder Filtrieren aufkonzentriert und den nachfolgenden Behandlungsschritten als eingedickter Schlamm zugeführt. Gelöste Stoffe verbleiben im Trübwasser, welches in die Abwasserreinigung rückgeleitet wird. Statische und maschinelle Eindickungsverfahren kommen sowohl vor der Entwässerung als auch vor und nach der Fäulung zum Einsatz. Details zu den Verfahren können der Literatur entnommen werden. [21, 22, 25, 30]

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 erläutert, erfolgt die **Schlammstabilisierung** in Belebungsanlagen mit anaerober Stabilisierung im Zuge der belebungsbeckenexternen Schlammbehandlung. Der kontrollierte Abbau organischer Stoffe erfolgt in Faultürmen unter Ausschluss von Sauerstoff (Schlammfäulung). Dieses Verfahren führt zur Bildung von Faulgas, welches als erneuerbarer Energieträger zur Bereitstellung von Elektrizität und Wärme eingesetzt werden kann (siehe Kapitel 2.4.3). Nähere Informationen zum Verfahren sind in der Literatur ersichtlich. [11, 19, 21, 22]

Nach dem Stand der Technik folgt der Eindickung eine **Entwässerung**. Diese dient der Erhöhung des Trockengehaltes (TG) auf bis zu 40 % und führt zu einer weiteren Reduktion des Schlammvolumens. Die Entwässerung erfolgt maschinell und teilweise unterstützt durch die Zugabe von Flockungshilfsmitteln. Der entwässerte Klärschlamm wird aufgrund des noch hohen Wassergehaltes vorwiegend weiteren Behandlungsschritten, beispielsweise einer Trocknung, thermischen Verwertung oder Kompostierung, zugeführt. Aufgrund des größeren Energieverbrauches von Trocknungsanlagen im Vergleich zu Entwässerungsaggregaten, gilt ein hoher TG nach der Entwässerung als wesentlich hinsichtlich Energieeffizienz. [21] Details zu den Apparaten können der Literatur entnommen werden. [21, 26, 31]

## 2.2.4 Vierte Reinigungsstufe

Die Verfahren der vierten Reinigungsstufe dienen der Elimination von organischen Spurenstoffen z.B. mittels Aktivkohlefilter oder Umkehrosmose. Die Spurenstoffe stammen z.B. von Arzneimitteln, Pestiziden, oder Reinigungsmitteln und können bei Einleitung in Oberflächengewässer zu Umweltschäden führen. Derzeit sind Verfahren dieser Art noch nicht standardmäßig in kommunalen ARAs integriert. [32]

## 2.3 Klärschlammnutzung

Bezüglich Klärschlammverwertung und -entsorgung zeigt sich im deutschsprachigen Raum in den letzten Jahren ein klarer Trend zur thermischen Verwertung. [21, 33, 34] Während in Österreich im Jahr 1995, 34 % des kommunalen Klärschlammaufkommens einer thermischen Verwertung zugeführt wurden, wurden im Jahr 2016, 53 % auf diesem Weg genutzt. [33] Eine Verstärkung dieser Entwicklung ist aufgrund nachfolgender Faktoren anzunehmen:

1. Aufgrund der Anforderungen der Deponieverordnung (§ 7, Absatz 7) [35] ist eine obertägige Deponierung von Abfällen mit einem organischem Kohlenstoffanteil > 5 Gewichtsprozent (Gew.%) bzw. einem Brennwert > 6.600 kJkg<sup>-1</sup> untersagt. Rein entwässerte Klärschlämme ohne mechanisch-biologische oder thermische Vorbehandlung können daher in der Regel keiner obertägigen Deponie zugeführt werden. [36] Dies führte zu einem Rückgang der direkten Deponierung von 31 % im Jahr 1995 auf 0,03 % im Jahr 2016. [33]
2. Die aktuelle EU-Gesetzgebung und der dadurch bedingte nationale rechtliche Rahmen begrenzen die Ausbringung von stabilisiertem Klärschlamm auf landwirtschaftliche Flächen, was in Österreich zu einer Reduktion des in der Landwirtschaft genutzten Schlammes von 23 % (1995) auf 20 % (2016) führte. [33] In Teilen Österreichs, wie Tirol oder Salzburg, gilt ein generelles Ausbringungsverbot, während in anderen Gebieten Grenzwerte, beispielsweise für Schwermetalle oder organische Schadstoffe, die Ausbringung beschränken. [37, 38] Eine weitere Reduktion des Anteils ist anzunehmen. Dies wird unterstützt durch das Positionspapier des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV), welches einen Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Verwertung (inkl. Kompostierung und Vererdung) für ARAs mit einer Ausbaukapazität größer 100.000 EW empfiehlt. [39]

3. Der entwässerte aerob stabilisierte Klärschlamm weist aufgrund der chemischen Zusammensetzung einen Energieinhalt von rund 18 MJ pro kg Trockensubstanz (TS) auf, während der entwässerte anaerob stabilisierte Schlamm mit einem Energieinhalt von  $11 \text{ MJkg}^{-1}\text{TS}^{-1}$  verbunden ist. Der Energieinhalt kann zur Erzeugung von Elektrizität und/oder Wärme mittels thermischen Verwertungsverfahren genutzt werden (siehe Kapitel 2.3.2 und 2.4.3), was zur Erhöhung der Energie- als auch Leistungsautarkiegrade beitragen kann. [34]
4. Darüber hinaus belegen Studien, dass auch Klärschlammaschen Pflanzennährstoffe, wie z.B. Phosphor beinhalten. Sind die Nährstoffe pflanzenverfügbar und enthält die Asche keine Schadstoffe, wie beispielsweise Schwermetalle, kann diese direkt als Dünger verwendet werden. [40] Klärschlammaschen aus Monoverbrennungs- oder vergasungsanlagen können überdies Verfahren zur Phosphorrückgewinnung zugeführt werden. Diese stellen noch keinen Stand der Technik in Österreich dar, werden aber gemäß Bundesabfallwirtschaftsplan forciert. Dieser sieht vor, bis 2030 65-85 % des Klärschlammanfalls einer Phosphorrückgewinnung zu unterziehen. [38, 39, 41]

Aktuell findet in Österreich die thermische Verwertung von Klärschlamm überwiegend in Mitverbrennungsanlagen statt. Laut Kretschmer et al. [42] wird in vier Anlagen zur thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen, in 53 weiteren (Mit-)Verbrennungsanlagen, sowie in einer Monoverbrennungsanlage (Simmeringer Haide) Klärschlamm eingesetzt. Thermische Verwertungsaggregate, welche direkt am Gelände der ARA betrieben werden, nachfolgend als dezentrale Aggregate bezeichnet, werden aktuell nicht standardmäßig in kommunalen ARAs integriert, sind jedoch in den letzten Jahren vermehrt Gegenstand von Pilotprojekten. [43–46] Folgende Faktoren bieten Anreize für dezentrale Lösungskonzepte:

1. Ist eine Ausbringung von Klärschlamm auf landwirtschaftliche Flächen gesetzlich erlaubt, kann diese in Regionen mit intensiver Viehhaltung oder Vergärung von organischen Abfällen dennoch zur Überdüngung führen. [47] Die Ausbringung im lokalen Umfeld einer kommunalen ARA ist daher nicht immer umsetzbar. Gemäß Döhler und Schliebner [48] können jedoch weite Transportwege zur Unwirtschaftlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung führen, da unter Einbezug der Transportkosten die Entsorgungskosten den monetären Wert des Klärschlammes als Dünger bereits bei einer Entfernung von 10 km übersteigen. Dies ist auf einen Wassergehalt von entwässertem Klärschlamm von etwa 70 –90 % zurückzuführen.
2. Die Wahl eines zentralen Entsorgungs- bzw. Verwertungspfades kann mit langen Transportwegen von bis zu 100 km verbunden sein. [49] Im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen gilt es daher neben den Abgabekosten, welche zwischen 80 und 500 € pro Tonne TS [34, 38] liegen, auch die Transportkosten zu

berücksichtigen. Hier fallen zusätzlich pro Tonne feuchtem Schlamm rund  $0,20 \text{ €km}^{-1}$  an. [48] Dezentrale Aggregate zur Trocknung und thermischen Verwertung von Klärschlamm bieten eine Möglichkeit die Transportkosten über die Reduktion des Wassergehaltes oder die Umwandlung in Klärschlammmasche zu senken.

3. Bei dezentraler thermischer Monoverwertung von Klärschlamm, stellen die Aschen Senken für Pflanzennährstoffe dar und können Verfahren zur Rückgewinnung, z.B. von Phosphor, zugeführt werden. [38–40]
4. Kommunale ARAs sind für etwa 20 % des Gesamtenergieverbrauchs der Gemeindedienstleistungen [50] und für 1 % des nationalen Gesamtstrombedarfes verantwortlich [19, 34]. Energieeffiziente Anlagen, sowie hohe elektrische und thermische Energie- und Leistungsautarkiegrade sind daher anzustreben. Dezentrale thermische Verwertungsanlagen liefern Strom und/oder Wärme und tragen sowohl zur Erhöhung der Energie- als auch Leistungsautarkiegrade bei. Die Erhöhung der Autarkiegrade führt zudem zur Reduktion der Kosten für extern zugekaufte Energie.
5. Die aktuell stattfindende Energiewende führt zur steigenden Integration dezentraler erneuerbarer Elektrizitätsquellen, wie z.B. PV-Anlagen, was zu technischen und infrastrukturellen Herausforderungen hinsichtlich der Elektrizitätsversorgung und -verteilung führt. Bei Fokus auf elektrische Mittel- und Niederspannungsnetze kann die Einbindung dezentraler Flexibilitätsdienstleister positive Effekte bezüglich Netzstabilität und Versorgungssicherheit hervorrufen. Kommunale ARAs können aufgrund energieintensiver Reinigungsaggregate und dezentraler Elektrizitätsversorgungseinheiten die Rolle von Flexibilitätsdienstleistern erfüllen. Die thermische Verwertung von Klärschlamm kann hier zusätzliche flexible elektrische Leistung liefern (siehe dazu Kapitel 3.2). [11]

Unter Berücksichtigung der derzeitigen Entsorgungssituation und aktuellen Entwicklungen, sowie der Notwendigkeit energieeffizienter Systeme, gewinnen dezentrale thermische Verwertungskonzepte an Attraktivität. Folgt der Schlammbehandlung ein thermisches Verwertungsverfahren ist eine weitere Erhöhung des Trockengehaltes essenziell. Lediglich bei der Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen oder Braunkohlekraftwerken können entwässerte Schlämme mit einem Trockengehalt von rund 30 % eingesetzt werden. Für die Nutzung in dezentralen thermischen Verwertungsaggregaten (z.B. Verbrennung oder Vergasung am ARA-Gelände) sind getrocknete Schlämme mit Trockengehalten  $> 60\%$  erforderlich. Daher beinhalten dezentrale Konzepte meist eine Klärschlamm-trocknung. Details zu Trocknungs- und Verwertungsaggregaten, die dezentrale Konzepte ermöglichen sind in den nachfolgenden Unterkapiteln ersichtlich. [34, 43]

### 2.3.1 Dezentrale Trocknung

Die thermische Trocknung dient der Verdunstung bzw. Verdampfung des Schlammwassers durch den Eintrag thermischer Energie, womit eine Reduktion des Wassergehaltes erreicht wird. Trocknungsanlagen sind Stand der Technik, wobei die Verfahrensprinzipien der Kontakt-, Konvektions- und Strahlungstrocknung unterschieden werden. Details zu den Verfahrensprinzipien können der Literatur entnommen werden. Bauarten, die sich für den dezentralen Einsatz eignen, sind die Scheiben-, Dünnschicht-, Band- und Trommeltrocknung, sowie die solare Trocknung. Bis auf die solare Trocknung erreichen alle Bauarten Trockengehalte über 90 %. Die solare Trocknung ist mit Trockengehalten von 50 – 70 % verbunden. [51, 52] Neben dem Trockengehalt und dem Klärschlammumsatz sind unter anderem Kriterien wie die Investitionskosten, die verfügbare Energieart (Abwärme, elektrische Energie, fossile Energie, Strahlungsenergie etc.), lokale Energiepreise und Nutzbarkeit der Trocknerabwärme bei der Auswahl des Aggregates zu beachten. Gemäß Literatur lässt sich eine dezentrale Trocknung bei heutigen Investitions- und Energiekosten ab einer Ausbaupazität von 50.000 EW wirtschaftlich betreiben. [21, 43, 51]

### 2.3.2 Dezentrale thermische Verwertung

Tabelle 2-2 ermöglicht einen Überblick über die derzeit bestehenden, vorwiegend in Pilotprojekten eingesetzten, Verfahrenskonzepte zur dezentralen thermischen Verwertung von Klärschlamm. Die Grundlagen zu den Verfahrensprinzipien der Pyrolyse, Verbrennung und Vergasung werden nachfolgend kurz dargestellt.

Der Prozess der **Pyrolyse** dient der thermischen Zersetzung von organischen Stoffen unter Sauerstoffausschluss. Je nach Temperaturbereich wird die Tief- (< 500°C), Mittel- (500-800°C) und Hochtemperaturpyrolyse (> 800°C) unterschieden. Das heizwertreiche Schwelgas, welches in Heizkesseln (HK) energietechnisch verwertet werden kann, stellt das Hauptprodukt dar. Zudem fallen Nebenprodukte (Pyrolyseöl und -koks) und Rückstände (Asche, Prozesswasser) an. [43, 53]

Die **Verbrennung** von Klärschlamm erfolgt meist bei überstöchiometrischen Bedingungen (Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda > 1$ ) und Temperaturen von 700 – 1.500°C. Die dabei anfallenden Rückstände sind inerte Gase und Asche. Das Rauchgas wird gereinigt und kann zur Bereitstellung von Wärme eingesetzt werden. Zudem bieten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen), wie z.B. Organic Rankine Cycle Prozesse (ORC-Anlagen), eine weitere Nutzungsmöglichkeit. Die Asche kann deponiert oder einer Phosphorrückgewinnung zugeführt werden. [38–40, 53]



Im Zuge der **Vergasung** werden feste, kohlenstoffhaltige Verbindungen bei Temperaturen von 800°C bis 1.600°C thermochemisch in ein energetisch (Elektrizität und Wärme) und stofflich (chemische Produkte) nutzbares Produktgas umgewandelt. Die Zusammensetzung des Produktgases unterscheidet sich je nach Vergasungsverfahren. Hinsichtlich der Art der Wärmezufuhr sind hier das allotherme und das autotherme Verfahren zu unterscheiden. Im Zuge der allothermen Vergasung wird die erforderliche Prozesswärme von außen zugeführt. Als Vergasungsmedium kommt hauptsächlich Wasserdampf zum Einsatz. Bei der autothermen Vergasung wird die Prozesswärme über eine partielle Oxidation des eingesetzten Brennstoffes bereitgestellt. Als Vergasungsmedium wird Luft bzw. Sauerstoff ( $0 < \lambda < 1$ ) verwendet. Neben dem Produktgas entsteht Asche, welche simultan zur Verbrennungsasche deponiert oder behandelt werden kann. Detaillierte Informationen zu diversen Verfahrenskonzepten und Produktgaszusammensetzungen sind in der Literatur zu finden. [38–40, 53]

**Tabelle 2-2: Verfahrenskonzepte zur dezentralen thermischen Verwertung von Klärschlamm (2020)**

Verfahrenskonzept	Verfahrensprinzip			Nutzbarer Output
	Pyrolyse	Verbrennung	Vergasung	
Pyrobustor [54]	Drehrohr (1.Kammer)	Drehrohr (2.Kammer)	-	Wärme, Asche
P500 Klärschlamm [55]	Schneckenreaktor	Flox-Brenner	-	Pyrolysekoks, Wärme
HD-PAWA-THERM [43, 56]	Drehrohr	-	-	Wärme, Elektrizität, Asche
Greenlife-Verfahren [57]	Doppelschneckenreaktor	Flox-Brenner	-	Pyrolysekoks, Wärme
T:CRACKER [58]	Schneckenreaktor	Brennkammer	-	Pyrolysekoks, Wärme
EcoDry [43, 59]	-	Zyklonfeuerung	-	Wärme, Asche
AWINA-Verfahren [60]	-	Schleuderrad-Rost-Feuerung	-	Wärme, Asche
sludge2energy [61]	-	Stationäre Wirbelschicht	-	Wärme, Asche, Elektrizität (Dampfkesselsystem)
BioCon™ [62]	-	Rost-Feuerung	-	Wärme, Asche
Pyrofluid™ [63]	-	Stationäre Wirbelschicht	-	Wärme, Asche
K <sup>3</sup> sludge [64]	-	Stationäre Wirbelschicht	-	Wärme, Asche
SynGas Module [65, 66]	-	-	Stationäre Wirbelschicht	Wärme, Asche Elektrizität (BHKW- & ORC-Modul)

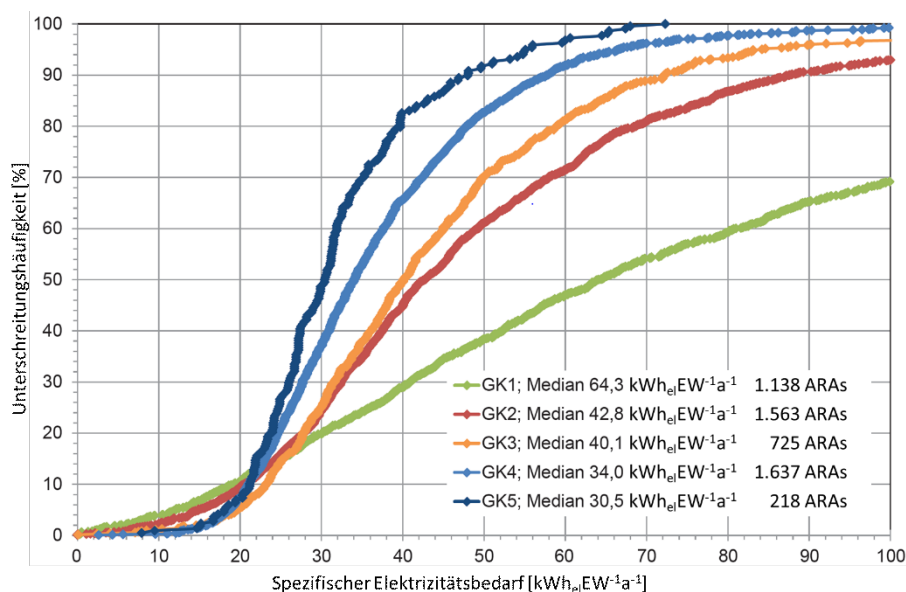
## 2.4 Energietechnische Charakteristika kommunaler ARAs

Die energietechnischen Charakteristika einer kommunalen ARA hängen von zahlreichen Faktoren wie der verfahrenstechnischen Ausstattung, der Ausbaukapazität, der Abwasserzusammensetzung, der Belastungssituation oder der topografischen Lage ab. Dies führt zu einer starken Schwankungsbreite hinsichtlich Elektrizitäts- und Wärmebedarf, sowie dezentraler (ARA-interner) Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung. [17, 67] Die nachfolgenden statistischen Daten ermöglichen einen Einblick in die energietechnischen Charakteristika von ARAs im deutschsprachigen Raum mit Fokus auf den Bedarf und die Versorgung von Elektrizität, sowie Wärme. Die jeweilig dargestellten Daten der Länder sind aufgrund der ähnlichen Strukturen der Abwasserbehandlung auf den deutschsprachigen Raum übertragbar.

### 2.4.1 Elektrizitätsbedarf kommunaler ARAs

Der hochgerechnete Gesamtelektrizitätsbedarf der österreichischen Kläranlagen liegt gemäß der Datenbasis von 2018 bei rund 780 Gigawattstunden (GWh) pro Jahr. Dabei sind Anlagen der GK4 und GK5 für rund 90 % des Gesamtbedarfes verantwortlich. [19]

Aufgrund der vorab erwähnten Einflussfaktoren ist der Elektrizitätsbedarf einzelner realer Abwasserreinigungsanlagen nur schwer vergleichbar. Um einen Vergleich zu ermöglichen, werden spezifische Werte in Kilowattstunden (kWh) pro EW und Jahr herangezogen. Die Abbildung 2-4 zeigt den spezifischen Elektrizitätsbedarf von 5.281 deutschen ARAs unterschiedlicher Größenklassen in Form einer Häufigkeitsverteilung. Für österreichische Anlagen ist eine analoge Häufigkeitsverteilung zu erwarten.



**Abbildung 2-4: Spezifischer Elektrizitätsbedarf von 5.281 deutschen ARAs nach Größenklassen – angepasste Darstellung nach [18]**

In der Darstellung wird ersichtlich, dass der spezifische Elektrizitätsbedarf mit zunehmender Ausbaupazität abnimmt. Der Median liegt bei Anlagen der GK1 bei rund  $64 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  und sinkt um ca. 52 % auf rund  $31 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  bei Anlagen der GK5. Zudem ist erkennbar, dass sich die Streubreite der Daten mit steigender GK verringert. So weisen 80 % der ARAs der GK5 einen spezifischen Elektrizitätsbedarf von  $20 - 50 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$ , der GK3 von  $20 - 70 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$ , und der GK1 von  $20 - 140 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  auf. Es gilt zu beachten, dass die Medianwerte stark von realen Anlagenwerten abweichen können, da bei der Auswertung Unterschiede hinsichtlich Abwasser- oder Schlammbehandlungsverfahren nicht berücksichtigt werden und etwaige Zusatzausstattungen, wie Filtration und Trocknung, inbegriffen sind. Da gemäß Kapitel 2.2.3.2 92 % der österreichischen ARAs Belebungsanlagen mit simultaner aerober oder mesophiler anaerober Stabilisierung sind, und sich dieses Branchenbild im gesamten deutschsprachigen Raum zeigt, gilt es diese genauer zu betrachten. Im Zuge des Projektes „arrivee“ [11] wurde der spezifische Elektrizitätsbedarf nach Aggregaten für Belebungsanlagen analysiert. Tabelle 2-3 zeigt die ermittelten Medianwerte nach GK, sowie die zugehörigen abgeschätzten Volllaststunden.

**Tabelle 2-3: Median des spezifischen Elektrizitätsbedarfes nach Größenklassen und zugehörige abgeschätzte Volllaststunden von Aggregaten kommunaler Abwasserreinigungsanlagen**

Aggregat	Spezifischer Elektrizitätsbedarf			Volllaststunden [hd <sup>-1</sup> ]
	GK1-3	GK4	GK5	
	[kWh <sub>el</sub> EW <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]			
Zulaufpumpwerk	4,39	3,39	2,68	24
Rechen	0,34	0,14	0,13	4
Sandfang	3,97	1,11	0,52	24
Vorklärung (inkl. PS-Pumpe)	0,15	0,31	0,20	4
Belüftung	20,58	15,58	13,82	24
Umwälzung	8,79	4,06	2,20	24
Rezirkulation	4,09	1,45	1,20	24
Rücklaufschlammpumpe	4,69	2,62	2,17	24
Nachklärung (inkl. ÜSS-Pumpe)	1,91	0,94	0,45	24
Filtration	4,69	2,62	2,17	24
Voreindickung	0,56	0,70	0,86	12
Faulung	6,82	2,67	1,60	24
Eindickung	0,38	0,16	0,04	12
Entwässerung	2,34	1,53	1,54	8
Sonstiges	0,17	0,86	0,71	8
Infrastruktur (Lüftung, Elektroheizung, Brauchwasser, Licht, Sonstiges)	8,13	3,33	2,66	8

Die Auswertung gemäß Tabelle 2-3 zeigt, dass vor allem die biologische Reinigung mit der Belüftung einen großen Einfluss auf den Gesamtbedarf hat. Dies führt dazu, dass Anlagen mit simultaner aerober Stabilisierung, aufgrund des höheren Schlammalters und dem damit verbundenem erhöhten Belüftungsaufwand, meist einen Mehrbedarf an elektrischer Energie von rund  $10 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  [19, 68] im Vergleich zu einer Anlage mit Schlammfäulung aufweisen. Daten zur weiteren Schlammbehandlung mittels Aggregaten zur Trocknung oder thermischen Verwertung von Klärschlamm wurden im Rahmen der Dokumentation des Projektes „arrivee“ [11] nicht veröffentlicht. Um einen Eindruck zum spezifischen Bedarf dieser Aggregate zu erhalten, wird nachfolgend auf Herstellerangaben, sowie Daten aus dem EU-Pilotprojekt „SusTreat“ zurückgegriffen. Hinsichtlich des spezifischen elektrischen Bedarfes von dezentralen Trocknungsaggregaten sind je nach Aggregattyp und -kapazität gemäß Herstellerangaben Werte von  $3 - 12 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  zu erwarten. [51, 69] Dezentrale Aggregate zur thermischen Klärschlammverwertung sind aktuell nicht standardmäßig in kommunalen ARAs integriert, womit Realdaten zum spezifischen Elektrizitätsbedarf schwer verfügbar sind. Einen Anhaltspunkt zum spezifischen elektrischen Bedarf einer dezentralen Klärschlammvergasung liefert das EU-Pilotprojekt „SusTreat“ mit einem Wert von rund  $2 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$ . [70]

### 2.4.2 Wärmebedarf kommunaler ARAs

Der hochgerechnete Gesamtwärmebedarf der ARAs in Österreich liegt gemäß der Datenbasis von 2018 bei rund  $420 \text{ GWh}_{\text{th}}\text{a}^{-1}$ . Wärme wird vor allem für die Beheizung der Infrastruktur und für die anaerobe Schlammstabilisierung eingesetzt. Da vor allem Anlagen der GK4 und GK5 über eine Schlammfäulung verfügen, sind diese für rund 95 % des Gesamtwärmebedarfes verantwortlich. Zusätzlicher Wärmebedarf kann durch Schlammbehandlungsverfahren, wie z.B. einer Trocknung, auftreten. [19]

Der Wärmebedarf für Betriebsgebäude hängt von der geografischen Lage, der Gebäudegröße, dem Gebäudezustand und dem Heizaggregat ab. Ein spezifischer Wärmebedarf  $< 2 \text{ kWh}_{\text{th}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  ist charakteristisch. [67] Liegen vollständig eingehauste Betriebsgebäude mit hohen Luftwechselraten vor, werden diese über beheizte Zuluftgeräte mit Wärme versorgt. Diese Aggregate weisen einen spezifischen Wärmebedarf  $< 10 \text{ kWh}_{\text{th}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  auf. [67]

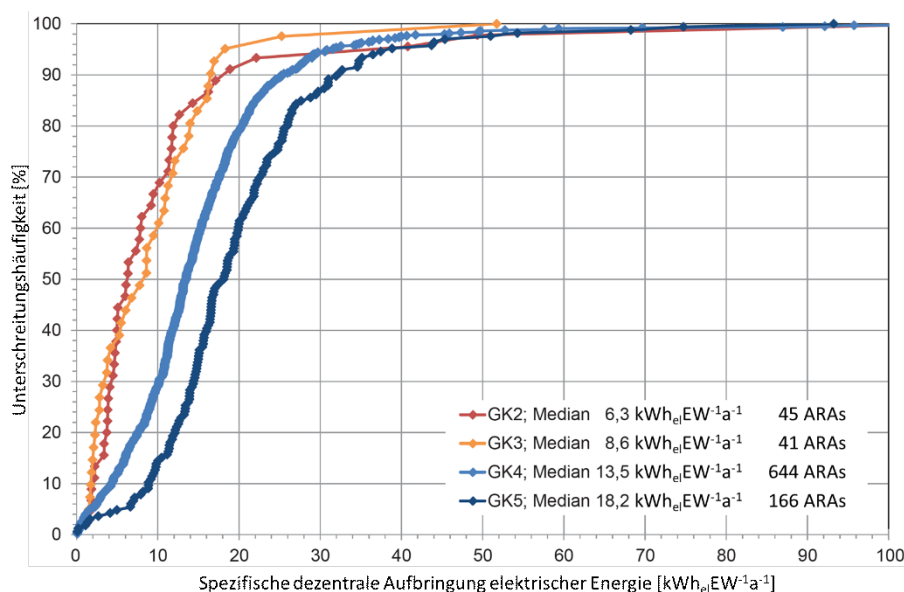
Das Verfahren der anaeroben Schlammstabilisierung ist gekennzeichnet durch einen Wärmebedarf für die Schlammaufheizung, ( $8-12 \text{ kWh}_{\text{th}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$ ) sowie für den Ausgleich von Transmissions-, Speicher- und Verteilungsverlusten ( $< 6 \text{ kWh}_{\text{th}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$ ). [67]

Der spezifische thermische Bedarf von dezentralen Trocknungsaggregaten beträgt gemäß Herstellerangaben je nach Aggregattyp und -größe bis zu  $44 \text{ kWh}_{\text{th}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  [51, 69]

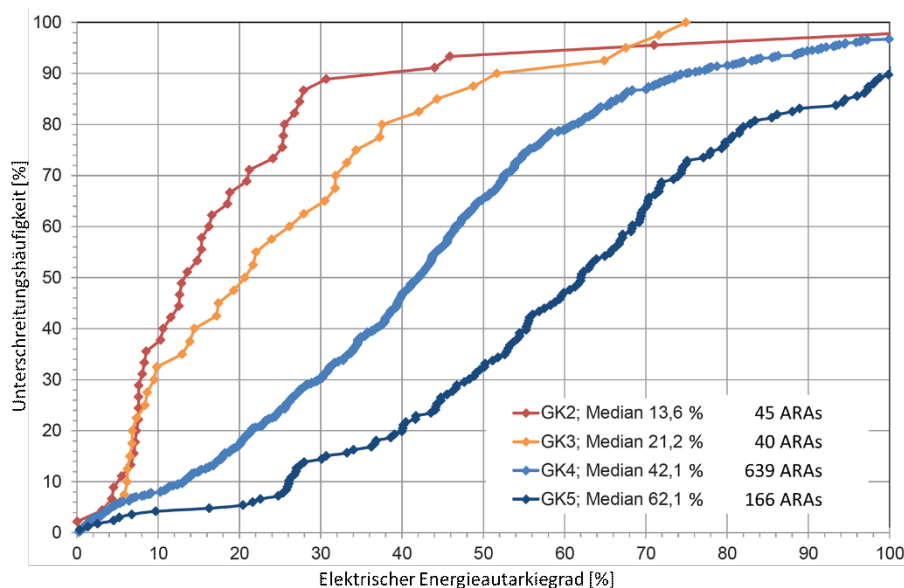
Dezentrale Aggregate zur thermischen Klärschlammverwertung sind aktuell nicht standardmäßig in kommunalen ARAs integriert, womit Realdaten zum spezifischen thermischen Bedarf schwer verfügbar sind. Der thermische Bedarf ist meist auf die Stützfeuerung mit Erd- oder Faulgas zum Anfahren des Aggregates bzw. Erwärmen des Klärschlammes zurückzuführen. [43, 70] Einen Anhaltspunkt zum spezifischen thermischen Bedarf einer dezentralen Klärschlammvergasung liefert das EU-Pilotprojekt „SusTreat“ mit einem Wert von bis zu  $9 \text{ kWh}_{\text{th}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  je nach Trockengehalt des eingesetzten Klärschlammes. [70]

### 2.4.3 Dezentrale Elektrizitäts- und Wärmeaufbringung kommunaler ARAs

Im Zuge des Abwasserbehandlungsprozesses entstehen Reststoffe, wie Faulgas und Klärschlamm, welche erneuerbare Energieträger darstellen. Diese können zur Bereitstellung von Elektrizität und Wärme eingesetzt werden, wobei die dezentrale (ARA-interne) Faulgasnutzung in Blockheizkraftwerken (BHKW) und Mikrogasturbinen (MGT) dem Stand der Technik entspricht. [11, 71] Die Häufigkeitsverteilung zur spezifischen dezentralen Aufbringung elektrischer Energie in  $\text{kWh}_{\text{el}}$  pro EW und Jahr von 895 deutschen Kläranlagen mit Faulgasnutzung ist in Abbildung 2-5 dargestellt. Die Aufbringung an elektrischer Energie ist im Zusammenhang mit dem elektrischen Energieautarkiegrad, dem Verhältnis von dezentraler Aufbringung und dezentralem Bedarf (siehe Kapitel 5.2.1), zu betrachten. Dieser gibt an in welchem Ausmaß der Elektrizitätsbedarf der Anlage mit der dezentral aufgetragenen elektrischen Energie gedeckt werden kann. Die Häufigkeitsverteilung des elektrischen Energieautarkiegrades ist in Abbildung 2-6 illustriert. [18]



**Abbildung 2-5: Spezifische dezentrale Aufbringung elektrischer Energie von 895 deutschen ARAs mit Faulgasnutzung nach Größenklassen – angepasste Darstellung nach [18]**



**Abbildung 2-6: Elektrischer Energieautarkiegrad von 890 deutschen ARAs mit Faulgasnutzung nach Größenklassen – angepasste Darstellung nach [18]**

Bei Betrachtung von Abbildung 2-5 und Abbildung 2-6 wird ersichtlich, dass die spezifische Aufbringung, sowie der elektrische Energieautarkiegrad mit zunehmender Ausbaukapazität steigen. Der Median der spezifischen dezentralen Aufbringung von elektrischer Energie liegt bei Anlagen der GK2 bei rund  $6 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  und erhöht sich auf rund  $18 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  bei Anlagen der GK5. Zudem nimmt der Median des elektrischen Energieautarkiegrades von rund 14 % bei Anlagen der GK2 auf rund 62 % bei Anlagen der GK5 zu. Dies ist vor allem auf die Abnahme des spezifischen Elektrizitätsbedarfes bei zunehmender Ausbaukapazität (siehe Abbildung 2-4) zurückzuführen. Die Streubreite der Daten zeigt, dass die Medianwerte stark von einzelnen Anlagenwerten abweichen können. Dies ist hauptsächlich darin begründet, dass im Rahmen der Auswertung Unterschiede hinsichtlich Abwasser- oder Schlammbehandlungsverfahren nicht berücksichtigt wurden.

Bezüglich der größenklassenabhängigen, spezifischen Aufbringung von thermischer Energie sind Häufigkeitsverteilungen nicht öffentlich verfügbar. Gemäß Lindtner [67] sind Werte zwischen  $20$  und  $40 \text{ kWh}_{\text{th}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  charakteristisch. Ähnliche Wertebereiche ergeben sich bei Abschätzung der spezifischen Aufbringung von Wärme anhand der Wirkungsgrade von Faulgas-BHKWs und -Mikrogasturbinen, sowie der spezifischen Aufbringung von Elektrizität gemäß Abbildung 2-5. Beachtet man, die Wirkungsgrade  $\eta$  von Faulgas-BHKWs ( $\eta_{\text{ges}} \leq 90 \%$ ;  $25 \% < \eta_{\text{el}} < 45 \%$ ) [17] liegt die spezifische Aufbringung von Wärme bei Anlagen der GK2 zwischen  $6$  und  $16 \text{ kWh}_{\text{th}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$ , sowie zwischen  $18$  und  $47 \text{ kWh}_{\text{th}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  bei Anlagen der GK5. Bei Betrachtung der Wirkungsgrade von Mikrogasturbinen ( $\eta_{\text{ges}} \leq 80 \%$ ;  $20 \% < \eta_{\text{el}} < 30 \%$ ) [72] beträgt die spezifische Aufbringung rund  $10$  bis  $19 \text{ kWh}_{\text{th}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  bei Anlagen der GK2, sowie rund  $30$  bis  $55 \text{ kWh}_{\text{th}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  bei Anlagen der GK5.

Faulgas, welches nicht in KWK-Anlagen (BHKW oder MGT) genutzt wird, kann zur reinen Bereitstellung von Wärme z.B. in Heizkesseln oder direkt bei gasbetriebenen Aggregaten eingesetzt werden. Beispielsweise wurde im Rahmen einer Studie von 64 ARAs mit anaerober Schlammstabilisierung in Rheinland-Pfalz erhoben, dass rund 14,2 % des auf den Anlagen anfallenden Faulgases Aggregaten zur Aufbringung von Wärme, sowie rund 0,4 % Direktantrieben zugeführt wird. [71] Liegen nicht verwertbare Überschüsse an Faulgas vor, wird dieses aufgrund der Klimawirksamkeit von Methan meist einer Fackel zugeführt, was aber aufgrund des Energieverlustes vermieden werden soll. Daher sind ARAs meist durch niedrige Fackelverluste gekennzeichnet. Eine Studie von 64 ARAs mit anaerober Schlammstabilisierung in Rheinland-Pfalz zeigt beispielsweise, dass 50 % der Anlagen unter 2 %, 25 % der Anlagen zwischen 5 % und 20 % und nur wenige Anlagen über 20 % des jährlich produzierten Faulgases abfackeln. [71]

Einen Anhaltspunkt zur spezifischen elektrischen und thermischen Energieaufbringung mittels einer dezentralen Klärschlammverwertung liefert das EU-Pilotprojekt „SusTreat“ zur Vergasung von Klärschlamm mit Werten von bis zu  $8 \text{ kWh}_{\text{el}} \text{EW}^{-1} \text{a}^{-1}$  und  $13 \text{ kWh}_{\text{th}} \text{EW}^{-1} \text{a}^{-1}$  je nach Zusammensetzung des eingesetzten Klärschlammes. [70]

Kann der Elektrizitäts- und Wärmebedarf einer kommunalen ARA nicht mittels dezentraler Faulgas- und Klärschlammverwertung bereitgestellt werden, wird Elektrizität und Wärme aus dem Netz bezogen oder unter Einsatz von extern zugekauftem Erdgas in den dezentralen Verwertungsaggregaten z.B. in BHKWs aufgebracht. [11, 68]

### **3 STAND DER FORSCHUNG**

Zur Abgrenzung der vorliegenden Arbeit zum aktuellen Stand der Forschung ist eine Untersuchung dessen essenziell. Dabei liegt der Fokus, auf einer Recherche zu Software-Tools zur Simulation von Abwasserreinigungsprozessen, sowie zum aktuellen Forschungsstand hinsichtlich der Flexibilisierung von kommunalen ARAs. Die Rechercheergebnisse bilden die Grundlage zur Ableitung der Forschungsziele und -fragen der vorliegenden Dissertation.

#### **3.1 Simulation im Kontext der kommunalen Abwasserbehandlung**

Im Bereich der Abwasserbehandlung werden Simulationsmodelle und darauf basierende Software-Tools vor allem bei der Bemessung, dem Steuerungsentwurf, der Betriebsführung und der Optimierung von Prozessen herangezogen. [17, 73–81]

Stationäre Simulationsmodelle beschreiben den Gleichgewichtszustand der Anlage zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. für einen spezifischen Zeitraum bei der Nutzung von Mittelwerten. Stationäre Modelle kommen insbesondere für die Bemessung von kommunalen ARAs zum Einsatz. Hinsichtlich der Relevanz zur Auslegung von Kläranlagen in Deutschland sind hier das DWA-Arbeitsblatt 131 [74] sowie der Ansatz der Hochschulgruppe Simulation (HSG) [75] hervorzuheben. Diese Berechnungsmodelle beziehen sich auf mittlere Zulaufparameter und dienen vorwiegend der Dimensionierung der biologischen Reinigung, wobei die Kohlen- und Stickstoffelimination im Fokus liegen. Im Rahmen der Modelle können Schwankungen im Tages- oder Jahresgang mittels Schwankungsfaktoren berücksichtigt werden. Energiespezifische Betrachtungen erfolgen im DWA-Arbeitsblatt 216 [17].

Vor allem im Bereich der Optimierung von Prozessparametern sind zeitlich aufgelöste Daten essenziell. Zu deren Ermittlung werden quasi-stationäre bzw. dynamische Simulationsmodelle eingesetzt. [73, 76, 81] Diese Modelle dienen der Beschreibung eines zeitabhängigen Prozesses. Hier unterscheidet man zwischen einer zeitdiskreten (äquidistante Zeitschritte = System erreicht innerhalb des Zeitschrittes den eingeschwungenen Zustand) und zeitkontinuierlichen (infinitesimal kleine Zeitschritte) Betrachtung. In Bezug auf kommunale ARAs werden vor allem dynamische Simulationen des Kohlenstoff- und Stickstoffabbaus durchgeführt, um die bio-chemischen Prozesse der biologischen Reinigung detailliert zu analysieren. Aktuell verfügbare Softwaretools, wie beispielsweise SIMBA# [77], BioWin [78], Sumo19 [79] und AQUASIM [80], basieren auf den Activated Sludge Modellen (ASM) nach Henze et al. [82]. Die Softwaretools ermöglichen je nach Umfang zudem die integrierte Simulation der Kanalsysteme, der Zulaufparameter des Abwassers, der Prozesse der mechanischen und ergänzenden Reinigung, sowie der Schlammbehandlung bis hin zur Schlammwässerung. Nähere Informationen zur integrierten Modellierung sind dem



Leitfaden der Hochschulgruppe Simulation [83] zu entnehmen. Des Weiteren ist mit den Softwaretools SIMBA<sup>#</sup>, BioWin und Sumo19 eine Generierung des zeitlich aufgelösten Energiebedarfs der im Rahmen der Simulation berücksichtigten Aggregate wie z.B. Pumpen, Rührwerke oder Belüftungseinheiten möglich. Insgesamt gilt zu beachten, dass die Genauigkeit zeitlich aufgelöster Simulationen vom Kenntnisgrad hinsichtlich des Aufbaues der ARA, des genutzten Schlammstabilisierungsverfahrens, der Zulaufparameter des Abwassers, sowie der kinetischen und stöchiometrischen Prozessparameter gemäß ASM nach Henze et al. [82] abhängt. Für repräsentative Analysen ist daher meist eine Messkampagne auf der zu untersuchenden ARA, sowie eine mehrstufige Anpassung und Kalibrierung der Simulationsmodelle mittels Realdaten essenziell. [76, 84]

Abschließend betrachtet legen die derzeit verfügbaren Simulationsmodelle den Fokus auf die Kohlen- und Stickstoffelimination in der biologischen Reinigung, was die Hauptaufgabe einer ARA darstellt. Die Energiebilanzierung nimmt im Vergleich eine untergeordnete Rolle ein. Die Prozesse der Klärschlammnutzung (siehe Kapitel 2.3) sind in den beschriebenen Softwaretools nicht inkludiert. Simulationsmodelle im Bereich der Klärschlamm-trocknung, Monoverbrennung oder -vergasung sind jedoch Teil diverser Forschungstätigkeiten. Vor allem Themengebiete wie die Trocknungskinetik [85], sowie die Thermodynamik und Kinetik der Verbrennungs- und Vergasungsprozesse [86–88] sind hier zu nennen.

### **3.2 Flexibilisierung kommunaler Abwasserreinigungsanlagen**

In den vergangenen Jahrzehnten dominierten zentrale Großkraftwerke die Elektrizitätsversorgung Österreichs. Diese stellen Grundlast bereit und bieten in Verbindung mit den Pumpspeicherkraftwerken ausreichende Flexibilität, um verbrauchsbedingte Schwankungen auszugleichen. Die durch die Energiewende zunehmende Integration erneuerbarer Energiequellen führt jedoch zu volatilen dezentralen Einspeisungen, welche insbesondere im Bereich der Verteilnetze neue Herausforderungen aufzeigen. Können das Angebot und die Nachfrage an elektrischer Energie in Nieder- und Mittelspannungsnetzen nicht kontinuierlich in Einklang gebracht werden, kann ein Überangebot oder eine Unterversorgung Spannungsbandverletzungen (DIN EN 50160 [9]) und Leitungsüberlastungen verursachen. Die Integration von Flexibilitätsdienstleistern, die netz- und/oder systemdienliche Flexibilität zum Angleich von Angebot und Nachfrage bereitstellen können, gewinnt daher im Zuge der Energiewende an Bedeutung. Die Bereitstellung und Vermarktung von Flexibilitätsdienstleistungen gewinnt zudem durch die Möglichkeit an Erneuerbaren-Energiegemeinschaften gemäß dem Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz [5] teilzunehmen an Attraktivität.

Betrachtet man die österreichweite dezentrale Anordnung der rund 1.900 kommunalen ARAs > 50 EW [19], sowie deren energieintensive Reinigungsprozesse, die dezentrale (ARA-interne) Aufbringung von elektrischer und thermischer Energie auf Basis der Reststoffe, Faulgas und Klärschlamm, und die meist vorhandenen Speichermöglichkeiten, wird deutlich, dass kommunale ARAs als Flexibilitätsdienstleister in Nieder- und Mittelspannungsnetzen agieren können. Dies bestätigen auch Studien zum Flexibilitätspotential von ARAs im deutschsprachigen Raum (siehe Kapitel 3.2.2). [11–14] Neben der Steigerung der energietechnischen Suffizienz und Effizienz kommunaler ARAs stellt daher auch deren Flexibilisierung ein wichtiges Forschungsgebiet im Bereich der Energietechnik und Siedlungswasserwirtschaft dar. [6, 10–12, 14, 89] Um einen Einblick in die Thematik zu erhalten wird im Kapitel 3.2.1 eine generelle Definition des Begriffes „Flexibilität“ vorgenommen. Zudem werden die Einsatzmöglichkeiten von Flexibilität im elektrischen Netz beleuchtet. Im Kapitel 3.2.2 wird der Flexibilitätsbegriff und die Einsatzmöglichkeiten von Flexibilität im Kontext der kommunalen Abwasserreinigung betrachtet.

### **3.2.1 Flexibilität und deren Einsatzmöglichkeit im elektrischen Netz**

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist Flexibilität, gemäß der EURELECTRIC, die Änderung der Stromeinspeisung und/oder die Änderung des Strombedarfs in Reaktion auf ein externes Signal (Preissignal oder Aktivierung), um damit eine Dienstleistung im Energiesystem zu erbringen. [90] Diese Definition umfasst die Flexibilitätsoptionen nach Abbildung 3-1.

Mittels Einspeisemanagement kann Flexibilität über die bedarfsgerechte Steuerung der flexiblen Aufbringungseinheiten für elektrische Energie, wie z.B. Blockheizkraftwerken, bereitgestellt werden. Dafür werden Aufbringungseinheiten innerhalb ihrer technischen Restriktionen hoch- oder heruntergefahren. Das Lastmanagement umfasst jegliche Maßnahmen zur Steuerung der flexiblen Lasten. Hier und in weiterer Folge beschreibt der Begriff „flexible Last“ flexibel steuerbare Aggregate mit Elektrizitätsbedarf, wie z.B. Pumpen. Sowohl Anreize zur Erhöhung der Energieeffizienz, flexible Tarife (Time-of-use-Tarife), sowie eine flexible Steuerung von Aggregaten ausgelöst durch externe Signale (Demand Response) sind Teil des Demand-Side-Managements. Im Zuge des Speichermanagements werden Kapazitäten diverser Speichertechnologien zur zeitlichen Verschiebung des Bedarfs oder der Aufbringung genutzt. Die drei Maßnahmenpakete können netz-, system- und marktdienlich eingesetzt werden und unterstützen damit unter anderem die Integration erneuerbarer Energiequellen. [11]

Einspeisemanagement	Flexibler Einsatz von erneuerbaren und konventionellen Stromerzeugungsanlagen
Lastmanagement	Energieeffizienzsteigernde Maßnahmen und Abruf von flexiblen Lasten (Demand-Side-Management inkl. Demand Response)
Speichermanagement	Einsatz diverser verfügbarer Speichertechnologien (z.B. Batterien, Gasspeicher und Schlammstapel)

**Abbildung 3-1: Kategorisierung der Flexibilitätsoptionen im elektrischen Netz – eigene Darstellung nach [11]**

### 3.2.1.1 Netzdienlicher Einsatz

Lokale Residuallasten können vor allem in Verteilernetzen zu Spannungsbandverletzungen (DIN EN 50160 [9]) und Leitungsüberlastungen führen. Die Residuallast  $P_R(t)$  wird mittels der Formel (3-1) berechnet und bezeichnet die nachgefragte Last  $P_L(t)$  abzüglich der volatilen erneuerbaren Energieeinspeisung  $P_{VEE}(t)$ . Negative Residuallasten zeigen ein Überangebot an volatiler erneuerbarer elektrischer Energie, während positive Residuallasten eine Deckung der restlichen Nachfrage mittels flexibler Aufbringung (siehe Kapitel 1) erfordert. [8]

$$P_R(t) = P_L(t) - P_{VEE}(t) \quad (3-1)$$

Der netzdienliche Einsatz von Flexibilitäten löst Leistungsanpassungen zum Ausgleich von Residuallasten aus und kann so investitionsintensive Maßnahmen, wie die Integration von regelbaren Ortsnetztransformatoren oder einen Netzausbau verzögern oder sogar vermeiden. Die netzdienliche Steuerung der Lasten, Energieaufbringungseinheiten und Speicher stellt aktuell noch keinen Stand der Technik dar, ist aber insbesondere für die Forschungsbereiche „Smart-Grids“ und „Erneuerbare-Energiegemeinschaften (EEG)“ von Relevanz. Vor allem die EEG nach dem Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz [5] bieten die Möglichkeit netzdienliche Flexibilität lokal (Niederspannungsnetz) oder regional (Mittelspannungsnetz) zur Residuallastreduktion einzusetzen. Attraktiv ist dies aufgrund finanzieller Erleichterungen. Teilnehmer einer EEG können mit einer Reduktion des Netzentgeltes (lokale EEG = -60%, regionale EEG = -30%), sowie einem Entfall des Erneuerbaren-Förderbeitrags und der Elektrizitätsabgabe für PV-Strom rechnen. [4, 5, 10, 11, 14]

### 3.2.1.2 *Systemdienlicher Einsatz*

Die Stromnetze in Europa werden mit einer Frequenz von 50 Hertz betrieben. Ein Ungleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage kann eine Frequenzabweichung herbeiführen, welche durch den Übertragungsnetzbetreiber behoben werden muss. Um eine stabile Netzfrequenz zu gewährleisten, wird Regelleistung als Systemdienstleistung eingesetzt, welche über den Regelreservemarkt ausgeschrieben wird. Hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Aspekte werden drei Arten der Regelreserve, die Primär- (PRL), Sekundär- (SRL), und Tertiärregelleistung (TRL), unterschieden. Die PRL wird direkt mittels Frequenzmessung abgerufen und dient dem kontinuierlichen, sowie sekundenschnellen Ausgleich (innerhalb von 30 Sekunden). Hingegen werden die SRL und TRL über Abrufbefehle, welche innerhalb von fünf beziehungsweise 15 Minuten beantwortet werden müssen, durch präqualifizierte Anlagen bereitgestellt. Dafür essenziell ist ein bidirektionaler Datenaustausch zwischen Anlage und Übertragungsnetzbetreiber, sowie eine Teilnahme an den Ausschreibungen des österreichischen Übertragungsnetzbetreibers, der Austrian Power Grid (APG). Die Teilnahme an den Ausschreibungen ist nach Erfüllung der technischen Präqualifikationsbedingungen und nach Unterzeichnung eines Rahmenvertrages möglich. Gemäß den Ausschreibungen ist ein Mindestangebot von einem MW<sub>el</sub> erforderlich, womit Flexibilitätsdienstleister bei einer Teilnahme am Regenergiemarkt mindestens eine Leistung dieser Größenordnung bereitstellen müssen. Um diese Schwelle zu erreichen können dezentrale Anlagen mit Flexibilitätpotentialen < 1 MW<sub>el</sub>, zu welchen auch kommunale ARAs zählen können, ihre Flexibilitätpotentiale bündeln. Nähere Informationen zum Präqualifikationsprozess, sowie den Ausschreibungen und Teilnahmebedingungen am Regenergiemarkt sind auf der Seite des österreichischen Übertragungsnetzbetreibers, der APG, verfügbar. [91]

### 3.2.1.3 *Marktdienlicher Einsatz*

Bei einem marktdienlichen Einsatz von Flexibilitäten steht die Kosten- und Erläsoptimierung im Vordergrund. Der Begriff umfasst sowohl den Handel mit elektrischer Energie auf Spot- und Terminmärkten als auch Modelle für dynamische Stromtarife und die Bilanzgruppenoptimierung. Flexibilität wird hier verwendet, um den Stromeinkauf zu optimieren und die ARA-interne elektrische Energieaufbringung sowie den elektrischen Energiebedarf auf Basis von Preissignalen anzupassen. [11]

### 3.2.2 Flexibilität und deren Einsatzmöglichkeiten im elektrischen Netz im Kontext der kommunalen Abwasserreinigung

Im Kontext der kommunalen Abwasserreinigung wurde der Begriff der Flexibilität erstmals im Rahmen des Projektes „arrivee“ [11] näher erläutert. Flexibilität wird hier, angelehnt an die Definition der EURELECTRIC, als die Fähigkeit einer technischen Anlage die elektrische Leistungsabgabe bzw. -aufnahme kurzfristig aufgrund eines externen Signales anzupassen, definiert. Angelehnt an die Einteilung der Flexibilitätsoptionen gemäß Abbildung 3-1 weist eine kommunale ARA aufgrund der dezentralen Elektrizitätsaufbringungseinheiten, der flexibel betreibbaren Lasten, sowie der Speicherkapazitäten in allen drei Maßnahmepaketen Flexibilitäten auf. Abbildung 3-2 präsentiert eine Übersicht über die Flexibilitätsoptionen einer kommunalen ARA.



**Abbildung 3-2: Optionen zur Bereitstellung positiver und negativer Flexibilität mittels kommunaler ARAs**

Je nach Bedarf kann eine kommunale Kläranlage sowohl positive als auch negative Flexibilität bereitstellen. Liegt eine Unterversorgung an Elektrizität im Stromnetz vor kann mittels Lastreduktion oder Hochfahren der internen Energieaufbringungseinheiten ein Ausgleich erfolgen. Im Gegensatz dazu können bei einem Überangebot zusätzliche Lasten eingeschaltet, aktuelle Lasten hochgefahren oder Energie aufbringende Einheiten heruntergefahren werden. Mittels flexibel steuerbarer Aggregate kann so dem Stromnetz sowohl elektrische Energie zugeführt (positive Flexibilität) als auch entnommen (negative Flexibilität) werden. Um die Möglichkeit eines Einsatzes kommunaler ARAs als Flexibilitätsdienstleister im elektrischen Netz beurteilen zu können, müssen neben einer Analyse der flexiblen Aggregate, der Speicherkapazitäten und der daraus resultierenden Flexibilitätspotentiale, mögliche Auswirkungen auf den Kläranlagenbetrieb untersucht werden. Detaillierte Betrachtungen auf Basis aktueller Studien [11–14] erfolgen im Rahmen der nachfolgenden Unterkapitel. Die im Rahmen aktueller Studien gewonnen Erkenntnisse hinsichtlich Anforderungen, Hemmnisse und Chancen einer Flexibilisierung werden in Kapitel 3.2.2.5 zusammengefasst. [11–14]

### 3.2.2.1 Flexible Aggregate kommunaler ARAs und deren Einsatz zur Bereitstellung von Flexibilität im elektrischen Netz

**Tabelle 3-1: Flexible Aggregate und deren Abschaltdauer nach Literaturstellen – erweitert und angepasst nach Schäfer [92]**

Flexibles Aggregat	Abschaltdauer <sup>1</sup> [min]				
	Müller et al. [12]		Reinhofer-Gubisch et al. [13]	Schloffer et al. [14]	Schäfer et al. [11]
	Tag	Nacht			
<b>Flexible Lasten</b>					
Hebewerk	15-30	30-60	5	60-120	5-15
Sandfanggebläse	15	15-30	-	Nutzbar	5-60
Sandfangräumer	-	-	5-15	-	-
Belüftung	15-30	15-120	15	180-360 <sup>1,2</sup>	5-60 <sup>2</sup> 5-120 <sup>3</sup>
Umwälzung	15	15-30	5-15	10-15	15-30
Rezirkulation	-	-	15	-	5-1.440
Rücklaufschlammpumpe	15-60	15-120	5-15	60-120	5-120
Faulung	15-120 <sup>4</sup>	> 120 <sup>4</sup>	-	Nutzbar <sup>5</sup>	15-30 <sup>6</sup> 15-1.440 <sup>7</sup>
Eindickung	-	-	240	Nutzbar	-
Entwässerung	> 120	-	240	Nutzbar	-
<b>Flexible Aufbringung</b>					
BHKW	< 660 <sup>2,8</sup>	< 660 <sup>2,8</sup>	15 <sup>2,8</sup>	-	5-1.440
1	Bei Trockenwetterzufluss		5	Inklusive Pumpen und Rührwerke	
2	Anlagen mit anaerober Schlammstabilisierung		6	Rührwerke und Rohschlammpumpe	
3	Anlagen mit aerober Schlammstabilisierung		7	Heizschlammpumpe	
4	Inklusive Pumpen, Rührwerke und Wärmetauscher		8	In Abhängigkeit vom Gasspeichervolumen	

Tabelle 3-1 stellt eine Zusammenfassung aktueller Studien im deutschsprachigen Raum dar und ermöglicht eine Übersicht hinsichtlich der zur Flexibilisierung von kommunalen ARAs einsetzbaren Aggregate inklusive deren Abschaltdauer. Die flexiblen Aggregate werden in flexible Lasten und flexible Aufbringung unterteilt. Dabei bieten flexible Lasten positive und negative Flexibilität mittels Lastreduktion oder -erhöhung gemäß Abbildung 3-2. Wird dabei Abwasser oder Schlamm aufgestaut sind Pufferkapazitäten erforderlich, welche gemäß Literatur [11–14] auf den jeweilig untersuchten ARAs bei den in Tabelle 3-1 aufgezeigten Abschalt Dauern ohne Kapazitätsausbau ausreichend zur Verfügung stehen. Flexible Aufbringungseinheiten können mittels Steuerung der Elektrizitätsaufbringung positive und negative Flexibilität bereitstellen (siehe Abbildung 3-2). Dafür sind vor allem Speicherkapazitäten für Energieträger, wie z.B. Faulgas oder Klärschlamm, erforderlich. Details zum Stand der Technik hinsichtlich Speicherkapazitäten auf kommunalen ARAs werden

in Kapitel 3.2.2.2 näher betrachtet. Wie in Tabelle 3-1 ersichtlich, werden in den aufgezeigten Studien verschiedene Aggregate zur Bereitstellung von netz- und systemdienlicher Flexibilität ausgewählt. Dies ist sowohl auf die Zielsetzung der jeweiligen Studie als auch auf die Rahmenbedingungen der untersuchten ARAs zurückzuführen. Auch hinsichtlich der Abschalt Dauern sind Unterschiede ersichtlich. Die Hintergründe zur Aggregatauswahl und Definition der Abschaltbedingungen werden nachfolgend genauer betrachtet. Die ermittelten Potentiale werden in Kapitel 3.2.2.3 näher erläutert.

In Müller et al. [12] liegt die Bereitstellung von systemdienlicher Flexibilität mittels Schweizer Infrastrukturanlagen im Fokus. Für Abwasserreinigungsanlagen werden die Potentiale zur kurz- ( $\leq 15$  Minuten), mittel- (mehrere Stunden) und langfristigen (saisonalen Ausgleich) Lastverschiebung und -reduktion für die flexiblen Lasten, sowie die flexible Aufbringung ermittelt. Für die flexiblen Lasten gilt: Die Abschaltdauer des Zulaufpumpwerkes ergibt sich in Abhängigkeit vom Stauvolumen vor den Pumpen. Je nach Kapazität wird eine Abschaltdauer von bis zu einer Stunde bei niedriger Auslastung bzw. einer halben Stunde bei hoher Auslastung (Tag) angenommen. Hinsichtlich der Flexibilisierung des Sandfangs und der Anlagen der biologischen Reinigung, wird der Erhalt der Reinigungsleistung als Grund für die maximalen Abschalt dauern angeführt. Bei den Anlagen der Schlammbehandlung wird angenommen, dass bei niedriger Auslastung, Abschaltungen von über zwei Stunden realisierbar sind. Eine Methodik zur Ermittlung der Abschalt dauern wird in der Studie nicht erwähnt. Zudem wird das Hochfahren, sowie die Zuschaltung von flexiblen Lasten nicht betrachtet. Für die flexible Aufbringung gilt: Die flexiblen Faulgas-BHKWs werden sowohl zur Bereitstellung von positiver, als auch negativer Flexibilität herangezogen. Als Einflussfaktoren bezüglich der Höhe des Potentials werden hier die Faulgasspeicherkapazitäten, die tägliche Faulgasproduktion, sowie die Nennleistung des Faulgas-BHKWs genannt. [12]

Reinhofer-Gubisch et al. [13] ermittelt das systemdienliche Flexibilitätspotential kommunaler Infrastruktur und die für einen Abruf erforderlichen Kosten. Die Auswahl der flexiblen Aggregate und die Rahmenbedingungen hinsichtlich ihrer Abschaltung basieren hier auf Erfahrungswerten und Einschätzungen der Anlagenbetreiber der vier untersuchten österreichischen kommunalen ARAs. Es werden keine weiteren methodischen Ansätze zur Ermittlung der Abschalt dauern angewendet. Regenerationszeiten werden im Rahmen der Analyse nicht berücksichtigt. Das Hochfahren und die Zuschaltung von flexiblen Lasten, sowie die Flexibilisierung der Aufbringung wird als nicht wirtschaftlich betrachtet und daher nicht näher untersucht. [13]

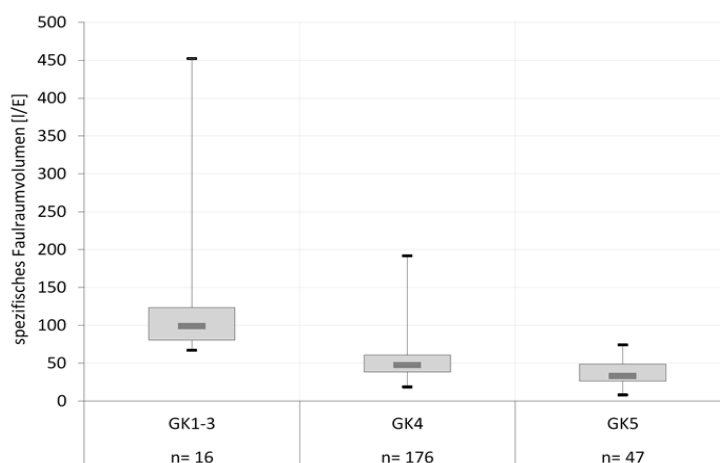
In Schloffer et al. [14] erfolgt eine Analyse der Flexibilitätspotentiale österreichischer kommunaler ARAs zur Integration in „smarte“ Energiesysteme. Die Mindestanforderungen hinsichtlich der zur Flexibilisierung herangezogenen flexiblen Lasten und Energieaufbringungseinheiten basiert auf den Resultaten zweier Expertenworkshops mit Anlagenbetreibern, sowie Interviews mit Netzbetreibern und Energielieferanten. Im Rahmen der Analysen auf den vier österreichischen Beispielkläranlagen werden alle Aggregate zur Flexibilisierung herangezogenen, welche eine minimale flexible Leistung von 5 kW<sub>el</sub> für Niederspannungsnetze und 50 kW<sub>el</sub> für Mittelspannungsnetze, sowie eine minimale Verfügbarkeit von 15 Minuten aufweisen. Zudem werden weitere Einflussfaktoren bezüglich der Aggregatwahl, wie Abwasser- und Schlamm-speicherkapazitäten oder Betriebssicherheit, anlagenspezifisch berücksichtigt. Da die Belüftung aufgrund des hohen Verbrauches ein vielversprechendes Potential darstellt, jedoch die Reinigungsleistung stark beeinflusst, wurde die Flexibilisierung mittels eines dynamischen Simulationsmodells gemäß Henze et al. [82] genauer analysiert. Unter Berücksichtigung der einzuhaltenden Ablaufgrenzwerte ergaben sich dabei je nach Belastungssituation Abschalt-dauern von maximal 14 Stunden bei aeroben Belebungsanlagen, sowie von höchstens 10 Stunden bei anaeroben Belebungsanlagen. Die Zuschaltung beziehungsweise das Hochfahren von flexiblen Lasten, sowie die Flexibilisierung der Aufbringung wird als technisch zu komplex erachtet und nicht näher untersucht. [14]

Der netz-, system- und marktdienliche Einsatz der Flexibilitätsoptionen deutscher kommunaler ARAs wird in Schäfer et al. [11] detailliert untersucht. Die Ermittlung der aggregatspezifischen Kennzahlen, wie Ab- und Zuschaltdauer, Regenerationszeit, oder An- und Abfahrzeit, (siehe Tabelle 10-1, Anhang S.215) der einzelnen flexiblen Aggregate, nachfolgend unter dem Begriff „Flexibilitätsparameter“ zusammengefasst, erfolgt hier erstmals mittels dynamischer Langzeitsimulationen und realer Abschaltversuche. Die gebündelten Resultate werden in Form von Datenblättern für die flexiblen Aggregate dargestellt. Neben den Flexibilitätsparametern wird im Zuge der Studie analysiert ob Aggregate positive und/oder negative Flexibilität bereitstellen können, welche verschiebbare Leistung je nach Größenklasse vorliegt und welche Auswirkungen auf den Betrieb sowie die Reinigungsleistung bei einer Flexibilisierung zu erwarten sind. Zudem beinhaltet Schäfer et al. eine Analyse von Regenwettereinflüssen. Hier wird betrachtet, ob das jeweilige Aggregat bei Regenwetter genutzt werden kann und wie stark dessen Verbrauch vom Zufluss abhängt. Somit kann abgeschätzt werden, ob sich die Flexibilität bei erhöhtem Zufluss, ausgelöst durch Regenereignisse verändert (siehe Tabelle 10-2, Anhang S.216). [11]



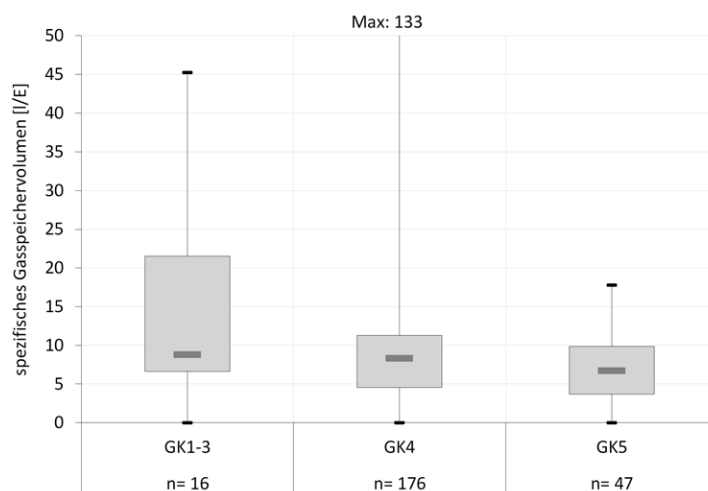
### 3.2.2.2 Speicherkapazitäten kommunaler ARAs und deren Einsatz zur Bereitstellung von Flexibilität im elektrischen Netz

Wie in Abbildung 3-1 ersichtlich ist das Speichermanagement ein Aspekt bei der Bereitstellung von Flexibilität. Um ARA-interne Energieaufbringungseinheiten flexibel betreiben zu können, müssen die erneuerbaren Energieträger Faulgas und Klärschlamm im Faulturm, Faulgasspeicher oder Schlammstapelbehälter gespeichert werden. Zudem ist eine Speicherung der elektrischen und thermischen Energie mittels diverser Speichertechnologien, wie Batterien oder Pufferspeichern, denkbar. Gemäß dem Stand der Technik wird vor allem die Speicherung der Energieträger vorgenommen, womit nachfolgend ein Fokus auf die drei genannten Speichermöglichkeiten gelegt wird. [11–14] Aufgrund der ähnlichen Strukturen im Bereich der Abwasserbehandlung (siehe Kapitel 2) wird angenommen, dass die für deutsche ARAs aufgezeigten statistischen Daten auf den deutschsprachigen Raum übertragbar sind.



**Abbildung 3-3: Spezifisches Faulraumvolumen kommunaler ARAs in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz nach Größenklassen [11]**

Abbildung 3-3 zeigt das spezifische Faulraumvolumen nach Größenklassen von 239 kommunalen ARAs mit anaerober Schlammstabilisierung in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz. Bei Betrachtung des laut DWA erforderlichen spezifischen Faulraumvolumens von 14-25 Liter pro EW wird ersichtlich, dass die Realdaten mit Medianwerten von 99, 47 und 33 Liter pro EW zum Großteil deutlich darüber liegen. [11] Dies deutet darauf hin, dass Faultürme Kapazitätsreserven aufweisen, die zur Gasspeicherung, für eine flexible Beschickung, sowie zur Vergärung von Klärschlämmen anderer ARAs oder Co-Substraten (z.B. Fett- oder Bioabfälle) genutzt werden können. Erfolgt eine thermische Verwertung des im Faulturm anfallenden Faulgases, beispielsweise mittels BHKW oder MGT (siehe Kapitel 2.4.3), wird dieses gemäß dem Stand der Technik kontinuierlich dem Faulturm entnommen, gereinigt und in Faulgasspeichern zwischengespeichert. [11, 93] Details zum spezifischen Gasspeichervolumen nach Größenklassen der 239 kommunalen ARAs in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz sind in Abbildung 3-4 ersichtlich.



**Abbildung 3-4: Spezifisches Gasspeichervolumen kommunaler ARAs in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz nach Größenklassen [11]**

Die derzeit auf Anlagen installierten Gasspeicher werden hauptsächlich für Faulgas genutzt, womit sich die Realdaten in Abbildung 3-4 auf Faulgasspeicher beziehen. Die Medianwerte des spezifischen Gasspeichervolumens liegen bei neun (GK1-GK3), acht (GK4) und sieben (GK5) Litern pro EW. Mit diesen Volumina können 34 % (GK1-GK3), 47 % (GK4) und 36 % (GK5) der Tagesproduktion zwischengespeichert werden. [11] In Schmitt et al. [71] wird ein Volumenanteil von 50 % der Tagesproduktion als charakteristischer Wert angegeben. Faulgasspeicher dienen vor allem dem Ausgleich einer schwankenden Gasproduktion, der Gewährleistung einer bedarfsgerechten internen Energieaufbringung oder der netz-, system- und marktdienlichen Flexibilisierung der Energieaufbringungseinheiten (z.B. BHKW). Gasspeicher können zudem zur Speicherung von Produktgasen aus thermischen Verwertungsprozessen, z.B. aus einem Klärschlammvergasungsprozess, eingesetzt werden.

Zur Speicherung von Klärschlamm werden Schlammstapelbehälter eingesetzt. Weit verbreitet sind Stapelbehälter für Primär-, Sekundär- und Tertiärschlamm vor einer anaeroben Stabilisierung oder für stabilisierten Schlamm vor der Schlammbehandlung. Je nach Bauweise beinhaltet der Behälter Rührwerke, Gasmesseinheiten oder Pumpen. Bei der Stapelung von nicht oder nur teilweise stabilisierten Schlämmen sind einige Aspekte zu beachten. So können beispielsweise mikrobielle Abbauprozesse zu Gas- (z.B. CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O) und Geruchsemissionen führen. Bei der Speicherung von Schlämmen mit hohem Wassergehalt sind zudem Reduktionen des TS-Gehaltes und eine Verschlechterung der Entwässerbarkeit zu erwarten. Hinsichtlich des Glühverlustes sind keine signifikanten Änderungen bekannt. [94] Das Volumen des Schlammstapelbehälters ist anlagenspezifisch und wird in der Literatur hauptsächlich in Zusammenhang mit der Auslegung von kommunalen ARAs thematisiert. Realdaten sind daher nicht in einem repräsentativen Ausmaß verfügbar. Das Volumen ist gemäß Gujer das Produkt der Lagerdauer und des täglich anfallenden Schlammes [21].

### 3.2.2.3 *Flexibilitätpotentiale kommunaler ARAs und deren Einsatz im elektrischen Netz*

Der Begriff „Flexibilitätpotential“ bezeichnet in weiterer Folge, aufbauend auf der Definition des Flexibilitätsbegriffes, die über einen bestimmten Zeitraum flexibel bereitstellbare elektrische Leistung. Dabei erfolgt die Unterscheidung des theoretischen und realisierbaren Flexibilitätpotentials. Das theoretische Flexibilitätpotential bildet die maximale flexible Leistung der flexiblen Aggregate je Zeitraum ab. Das realisierbare Potential beschreibt den Anteil des theoretischen Potentials, der unter Einbezug der Flexibilitätsparameter der flexiblen Aggregate (siehe Tabelle 10-1, S.215), der Speicherkapazitäten, sowie des Bedarfsprofils an netz-, system- oder marktdienlicher Flexibilität nutzbar ist.

Müller et al. [12], Reinhofer-Gubisch et al. [13], Schloffer et al. [14] und Schäfer et al. [11] präsentieren realisierbare Flexibilitätpotentiale von kommunalen ARAs unterschiedlicher Größenklassen im deutschsprachigen Raum. Die Flexibilitätpotentiale basieren auf den jeweiligen flexiblen Aggregaten und deren Leistungen, sowie den zugehörigen Flexibilitätsparametern und -bedarfssituationen. Aufgrund der Diversität die kommunale ARAs in diesen Bereichen aufweisen, sind auch die Flexibilitätpotentiale durch eine große Schwankungsbreite gekennzeichnet. Um eine Vergleichbarkeit der Studienergebnisse zu ermöglichen, werden die Potentiale nachfolgend als spezifische elektrische Flexibilitätpotentiale in Watt pro Einwohnerwert ( $W_{el}EW^{-1}$ ) dargestellt. Zudem erfolgt eine differenzierte Betrachtung der positiven und negativen Flexibilitätpotentiale. Hier wird auf die Definition der positiven und negativen Flexibilität gemäß Abbildung 3-2 zurückgegriffen, womit die Nutzung von positiven Flexibilitätpotentialen den externen Strombezug reduziert und die Nutzung von negativen Flexibilitätpotentialen zur Erhöhung des Strombezuges führt. Die untersuchten österreichischen Anlagen der GK1-GK3 (<10.000 EW) in Reinhofer-Gubisch et al. [13] besitzen keine flexiblen Energieaufbringungseinheiten und Gasspeicher, womit nur die Abschaltung der flexiblen Lasten der Reinigungsstufen und der Schlammbehandlung bei der Potentialermittlung berücksichtigt wird. Es werden positive Flexibilitäten zwischen 2,9 und 22  $W_{el}EW^{-1}$  für 5 min, sowie zwischen 2,7 und 22  $W_{el}EW^{-1}$  für 15 min abgeschätzt. Gemäß Schäfer et al. [11] verfügt ein Teil der deutschen Anlagen der GK1-GK3 über KWK-Anlagen, welche ein zu- bzw. abschaltbares spezifisches Potential von 4,1  $W_{el}EW^{-1}$  für rund 6 bzw. 8 Stunden (h) pro Tag (d) aufweisen. Zudem verfügen die deutschen ARAs auf Basis der flexiblen Lasten über eine positive Flexibilität von 5,2  $W_{el}EW^{-1}$  für bis zu 0,5  $hd^{-1}$  und eine negative Flexibilität von 1,9  $W_{el}EW^{-1}$  für bis zu 2,5  $hd^{-1}$ .

**Tabelle 3-2: Realisierbares positives und negatives spezifisches elektrisches Flexibilitätspotential bei kommunalen ARAs der GK4 nach Literaturstellen**

Dauer der Bereitstellung [mind <sup>-1</sup> ]	Realisierbares positives/negatives spezifisches Flexibilitätspotential [W <sub>el</sub> EW <sup>-1</sup> ]			
	Müller et al. [12]	Reinhofer-Gubisch et al. [13]	Schloffer et al. [14]	Schäfer et al. [11]
5	-/-3,4	2,3/-	4,1/-	5,3/-3,3
15	5,3/-3,4	2,4/-	4,1/-	5,3/-3,3
30	4,9/-3,4	-	4,1/-	5,3/-3,3
60	4,7/-3,4	1,1/-	1,6/-	4,1/-3,3
240	4,1/-3,4	0,8/-	1,4/-	2,1/-2,3
720	-/-3,4	0,6/-	1,4/-	2,1/-2,1

Die realisierbaren positiven und negativen spezifischen Flexibilitätspotentiale, der im Rahmen der Studien untersuchten Anlagen der GK4 (10.001-100.000 EW), zeigt Tabelle 3-2. Tabelle 3-2 verdeutlicht, dass die untersuchten kommunalen ARAs der GK4 positive und negative Flexibilitäten bis zu 12 h pro Tag bereitstellen können. Die höchsten Potentiale sind für die Abschalt Dauern von bis zu 30 min nutzbar. Vor allem die Belüftung und Rührwerke der Belebungsbecken, sowie die energieintensiven Pumpen des Zulaufpumpwerks und der Belebung (Rezirkulations- und Rücklaufschlammumpen) sind für die hohen Potentiale verantwortlich. Die für bis zu 12 h verfügbaren positiven Flexibilitäten sind auf die Abschaltung der Belüftung und der flexiblen Lasten der Schlammbehandlung (Faulbehälterumwälzpumpe und Zentrifuge) zurückzuführen. [11–14] Eine Lasterhöhung mittels flexibler Lasten wird nur in Schäfer et al. [11] betrachtet. Diese können eine negative Flexibilität von -1,1 W<sub>el</sub>EW<sup>-1</sup> für bis zu 3 h zur Verfügung stellen. Bei den in Müller et al. [12] und Schäfer et al. durchgeführten Analysen erfolgt zudem eine Untersuchung des Flexibilitätspotentials der Faulgas-BHKWs. Eine Erhöhung der aufgebrachten elektrischen Energiemenge führt zur Steigerung der positiven Flexibilität und ist je nach Gasspeichervolumen bis zu 12 h möglich. Die Reduktion der aufgebrachten elektrischen Energiemenge führt zu negativen Flexibilitätspotentialen, welche je nach Gasspeichervolumen ebenfalls bis zu 12 h abrufbar sind.

Die in Müller et al. [12] untersuchten Kläranlagen der GK5 (>100.000 EW) zeigen im Vergleich zu den in Müller et al. analysierten Anlage der GK4 (siehe Tabelle 3-2) für die jeweiligen Abschalt Dauern erhöhte positive (jeweils +1 W<sub>el</sub>EW<sup>-1</sup>) und negative Flexibilitätspotentiale (jeweils -2 W<sub>el</sub>EW<sup>-1</sup>) auf. Die positiven Potentiale sind vor allem auf die Abschaltung der Belüftung und Rührwerke der Belebung, sowie der Pumpen des Zulaufpumpwerks zurückzuführen. Zudem weisen in beiden Anlagen die BHKWs positive und negative Flexibilitätspotentiale auf.

**Tabelle 3-3: Bundesweites realisierbares positives und negatives spezifisches elektrisches Flexibilitätspotential nach Literaturstellen**

Dauer der Bereitstellung [mind <sup>-1</sup> ]	Realisierbares positives/negatives spezifisches Flexibilitätspotential [W <sub>el</sub> EW <sup>-1</sup> ]			
	Schweiz – nach Müller et al. [12]	Österreich – nach Reinhofer-Gubisch et al. [13]	Österreich – nach Schloffer et al. [14]	Deutschland – nach Schäfer et al. [11]
5	-	1,3/-	1,0/-	-
15	4,4/-2,1	1,2/-	1,0/-	-
30	-	-	1,0/-	-
60	-	0,1/-	1,0/-	-
240	2,7/-2,1	-	1,0/-	-
720	-	-	1,0/-	-
Nicht angegeben	-	-	-	2,1/-2,1 <sup>1</sup> 1,0/-2,8 <sup>2</sup>
1	Energieaufbringungseinheiten		2 Flexible Aggregate	

Tabelle 3-3 zeigt die bundesweiten realisierbaren positiven und negativen spezifischen Flexibilitätspotentiale. Hier werden die Potentiale aller Anlagen der unterschiedlichen Größenklassen aufsummiert und mit dem jeweiligen EW dividiert. In Müller et al. [12] wird für die Schweiz ein EW von 12.593.000 angenommen, womit sich positive Potentiale von 56 MW<sub>el</sub> (15 min) und 34 MW<sub>el</sub> (240 min) ergeben. Zudem zeigt sich ein für 15 und 240 min abrufbares negatives Potential von -27 MW<sub>el</sub>, welches vor allem durch die Erhöhung der BHKW-Leistung bedingt ist. In Reinhofer-Gubisch et al. [13] und Schloffer et al. [14] beträgt der österreichische EW 21.032.561. Dies führt in Reinhofer-Gubisch et al. zu maximalen positiven Potentialen von 27 MW<sub>el</sub> (5 min), 26 MW<sub>el</sub> (15 min) und 3 MW<sub>el</sub> (60 min). In Schloffer et al. wird angenommen, dass ein positives Flexibilitätspotential von 20 MW<sub>el</sub> bis zu 12 Stunden abgerufen werden kann. Die niedrigen spezifischen Potentiale für die Summe der österreichischen Anlagen, ist hauptsächlich auf die fehlende Flexibilisierung der Aufbringungseinheiten zurückzuführen. [13, 14] In Schäfer et al. [11] wird keine zeitliche Verfügbarkeit der Gesamtpotentiale angegeben. Hier wird für die flexible Aufbringung bei 104.075.432 EW (Deutschland) ein positives und negatives elektrisches Flexibilitätspotential von rund +/-215 MW<sub>el</sub> ermittelt. Zusätzlich kann mittels der flexiblen Lasten bei 119.589.259 EW (Deutschland) ein positives Potential von 338 MW<sub>el</sub> und ein negatives Potential von -123 MW<sub>el</sub> bereitgestellt werden.

#### 3.2.2.4 Auswirkungen einer Flexibilisierung auf den ARA-Betrieb

Die Bereitstellung von Flexibilität ist mit Eingriffen in die Abwasserreinigungs-, Schlammbehandlungs- und Energieaufbringungsprozesse der ARA verbunden. Hier gilt vor allem zu beachten, dass kommunale ARAs gesetzlich verpflichtet sind Ablaufgrenzwerte [95] einzuhalten, womit die Reinigungsleistung trotz Flexibilisierungseingriffe stets gewährleistet sein muss. Um dies sicherzustellen ist es essenziell mögliche Auswirkungen einer

Flexibilisierung auf den ARA-Betrieb zu untersuchen. Im Rahmen des Projektes „arrivee“ [11, 92] wurden mögliche Auswirkungen auf die Prozesse auf Basis eines Feldversuches, sowie anhand von darauf basierenden Simulationen analysiert. Tabelle 3-4 zeigt eine Zusammenfassung wichtiger Erkenntnisse.

**Tabelle 3-4: Mögliche Auswirkungen auf die Abwasserreinigungs-, Schlammbehandlungs- und Energieversorgungsprozesse einer kommunalen ARA durch die Flexibilisierung von flexiblen Lasten und Energieaufbringungseinheiten – angepasste Aufzählung nach [11, 92]**

Flexibles Aggregat	Mögliche Auswirkungen auf den ARA-Betrieb
<b>Flexible Lasten</b>	
Hebewerk	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absetzen von Feststoffen und/oder organischen Substanzen im vorgelagertem Kanalnetz</li> </ul>
Sandfang	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absetzen organischer Substanzen</li> </ul>
Belüftung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zu starke Reduktion des Sauerstoffgehaltes im Belebungsbecken</li> <li>• Unzureichende Durchmischung des Belebtschlammes</li> <li>• Phosphor Rücklösung durch lange Anaerobzeiten denkbar</li> </ul>
Rührwerke	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Negative Beeinflussung des Absetzverhaltens</li> </ul>
Rezirkulation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anstieg der NO<sub>3</sub>-N-Ablaufkonzentration möglich</li> </ul>
Rücklaufschlamm- pumpe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TS-Gehalt im Belebungsbecken kann bei langer Abschaltung und hohem Zufluss stark absinken</li> <li>• Schlammabtrieb aus der Nachklärung bei langer Abschaltung möglich</li> </ul>
Faulung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auslösen von Temperaturschwankungen mit Einfluss auf die anaeroben Umsetzungsprozesse und damit auf die Faulgasproduktion</li> <li>• Schaumbildung im Faulturm</li> <li>• Anpackungen bei langer Abschaltung</li> </ul>
Eindickung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anpackungen bei langer Abschaltung</li> </ul>
Entwässerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anpackungen bei langer Abschaltung</li> </ul>
<b>Flexible Aufbringung</b>	
BHKW	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduktion der Nutzungsdauer durch erhöhte Anzahl der Schaltzyklen</li> <li>• Abgleich der ARA-Last- und Aufbringungsprofile wird eingeschränkt</li> <li>• Stromgeführter Betrieb führt zur Beeinflussung der Wärmeversorgung</li> </ul>

Vor allem Eingriffe in den Betrieb der Belüftung, sowie der Rücklaufschlamm-pumpen können gemäß Tabelle 3-4 die Reinigungsleistung negativ beeinflussen. Zu lange Abschaltdauern (Belüftung > 60 min und Pumpe > 120 min [11]) können mit einer Überschreitung der Ablaufgrenzwerte verbunden sein. Hinsichtlich der Schlammbehandlung gilt es die möglichen Auswirkungen bei Eingriffen in den Betrieb des Faulturms hervorzuheben. Eine Abschaltung der Beschickungspumpen, sowie ein Herunterfahren der Wärmeaufbringung können zur Senkung der Temperatur im Faulraum führen. In weiterer Folge kann dies eine Reduktion der Faulgasproduktion mit sich bringen. Gemäß Schäfer et al. [11] führt beispielsweise eine Abschaltung der Wärmezufuhr für 24 h bei kontinuierlicher Beschickung zu einer Abkühlung von bis zu 2°C. Weitere Details zur Faulraumabkühlung sind der Literatur [11] zu entnehmen.

Die Wärmeversorgung der ARA-Prozesse und deren Zusammenhang mit der Stromversorgung ist auch ein wichtiger Aspekt bei der Betrachtung der Auswirkungen auf die Energieaufbringungsprozesse. Die zur Faulgasnutzung eingesetzten KWK-Anlagen liefern sowohl Strom als auch Wärme (siehe Kapitel 2.4.3). Gemäß dem Stand der Technik wird dabei versucht möglichst hohe Energie- und Leistungsautarkiegrade (siehe Kapitel 5.2) zu erreichen, um die Kosten für extern zugekaufte elektrische und thermische Energie zu reduzieren. Erfolgt eine Flexibilisierung der Aufbringung können die Aufbringungsprofile bei einem Abruf von Flexibilität nicht den Lastprofilen der ARA angepasst werden. Dies führt einerseits zu reduzierten Energie- und Leistungsautarkiegraden, und andererseits zu Unterbrechungen bei der Eigenversorgung von Reinigungs- und Schlammbehandlungsprozessen. Hier müssen bei langfristigen Abschaltungen Zukäufe an Wärme und Strom erfolgen, oder Speichermöglichkeiten zum Ausgleich von Schwankungen zur Verfügung stehen. [11–14, 92]

### *3.2.2.5 Fazit zur Flexibilisierung von kommunalen Kläranlagen – Anforderungen, Herausforderungen und Chancen*

Der aktuelle Stand der Forschung zeigt, dass eine kommunale ARA als flexibler Baustein in elektrischen Netzen eingesetzt werden kann. Dabei ist unter Berücksichtigung bestimmter **Anforderungen** die Bereitstellung von positiver und negativer Flexibilität möglich. Da die Reinigung von kommunalem Abwasser die Hauptaufgabe darstellt, gilt der Erhalt der Reinigungsleistung als Grundvoraussetzung. Um eine Einhaltung der Ablaufgrenzwerte [95] zu gewährleisten, sind bei der Flexibilisierung maximale Abschaltdauern, minimale Zuschaltdauern und Regenerationszeiten für die flexiblen Lasten und Energieaufbringungseinheiten zu berücksichtigen (siehe Tabelle 10-1, Anhang S.215). Zudem ist der Einfluss von Regenereignissen zu beachten. Der erhöhte Zufluss bei Regenwetter führt zu einer Hochlastphase, in welcher einige Aggregate nur eingeschränkt bzw. gar nicht zur Bereitstellung von Flexibilität genutzt werden können (siehe Tabelle 10-2, Anhang S.216). [92] Neben der Reinigungsleistung und der Belastungssituation sind auch Anforderungen an die Anlagenausstattung identifizierbar. Hinsichtlich der flexiblen Lasten und Energieaufbringungseinheiten sind kurze Reaktionszeiten bei der Ab- und Zuschaltung von < 5 min wünschenswert, um schnell auf Grenzwertwertabweichungen im Netz reagieren zu können. [11–14] Des Weiteren lassen eine Abschaltdauer von mindestens 15 min und minimal verfügbare Leistungen  $\geq 5$  kW in Niederspannungsnetzen bzw.  $\geq 50$  kW in Mittelspannungsnetzen auf ein ausreichend hohes Flexibilitätspotential hoffen. [14] Bei abschaltbaren Lasten und Aufbringungseinheiten sind daher auch hohe Volllaststunden förderlich. Verfügbare Speicherkapazitäten für Klärschlamm, Faulgas und weitere Produktgase ermöglichen die Flexibilisierung der ARA-internen Energieaufbringung. Hier gilt, je höher das Speichervolumen, desto länger steht die Flexibilität zur Verfügung. [12]

Bei Betrachtung der Anforderungen wird ersichtlich, dass die Flexibilisierung einer kommunalen ARA auch mit **Herausforderungen** verbunden ist. Von den Anlagenbetreibern wird eine detaillierte Kenntnis der Prozesse und Aggregate gefordert. Um das Flexibilitätspotential abschätzen und bereitstellen zu können, gilt es Wissen bezüglich der Flexibilitätsparameter der flexiblen Aggregate (siehe Tabelle 3-1 und Tabelle 10-1, Anhang S.215), sowie deren Last- und Aufbringungsprofile aufzubauen. Zudem können Investitionskosten für die Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) anfallen, die den Datenaustausch mit den Netzbetreibern gewährleisten. Zusätzliche Energiekosten durch eine Verschiebung der Lastspitzen sind ebenfalls möglich. Bedenken hinsichtlich des Erhalts der Reinigungsleistung bei externen Eingriffen und der Aufwand einer Präqualifikation stellen weitere Hemmnisse dar. Zur Überwindung der Hemmnisse könnten (monetäre) Anreize für die Anlagenbetreiber geboten werden. Netzbetreiber sind jedoch aufgrund der von der Regulierungsbehörde vorgeschriebenen Systemnutzungsentgelte in ihren Möglichkeiten, Anreize zu bieten, beschränkt. Zudem stellen aus Sicht der Netzbetreiber die im Vergleich zu Kraftwerken geringen, sowie sehr anlagenspezifischen Flexibilitätspotentiale und deren Abhängigkeit von der Belastungssituation der kommunalen ARA weitere Herausforderungen dar. Bei bekannten Flexibilitätspotentialen wird jedoch ein netzdienlicher Einsatz in Erneuerbaren-Energiegemeinschaften [5] in Mittel- und Niederspannungsnetzen von Netzbetreibern und Energieversorgern als sehr positiv erachtet. [11, 14]

Können die Anforderungen erfüllt und die Herausforderungen überwunden werden, bietet die Flexibilisierung auch **Chancen**. Das erweiterte Knowhow hinsichtlich der stationären und dynamischen energietechnischen Charakteristika der Aggregate und ARA-internen Energieaufbringungseinheiten kann von den Anlagenbetreibern, neben der Bereitstellung von netz- und systemdienlicher Flexibilität, dazu genutzt werden das Aufbringungsprofil an den Lastverlauf anzupassen. Dies kann zur Reduktion der Kosten für extern zugekaufte elektrische und thermische Energie führen. Aus Sicht der Netzbetreiber kann der netz- und systemdienliche Einsatz von Flexibilitätspotentialen kommunaler ARAs vor allem in Nieder- und Mittelspannungsnetzen durch die Reduktion von Spannungsbandverletzungen (DIN EN 50160 [9]) die Betriebsmittelauslastung, die Versorgungssicherheit, sowie die Integration erneuerbarer Energiequellen positiv beeinflussen. In weiterer Folge kann dies zur Reduktion fossiler Erzeugungskapazitäten, sowie zur Verzögerung oder sogar Vermeidung eines Netzausbaus beitragen. Zudem können Anlagenbetreiber durch die Reaktion auf externe Abrufe (systemdienliche Flexibilität) und Preissignale (marktdienliche Flexibilität) Erlöse generieren. Hinsichtlich des systemdienlichen Einsatzes gilt aufgrund der Anforderungen der Netzbetreiber vor allem die Bereitstellung von SRL und TRL zum Beispiel auch im Rahmen von Energiegemeinschaften als umsetzbar. [5, 11, 14]



## 4 ABGRENZUNG UND ZIELSETZUNG

Die Betrachtung des Standes der Technik und der Forschung wirft offene Forschungsfragen auf, welche noch weiterer Untersuchung bedürfen. Diese stellen die Basis für die übergeordnete Forschungsfrage und Zielsetzung der vorliegenden Dissertation dar.

### 4.1 Offene Forschungsfragen auf Basis des Standes der Forschung

Bei Analyse der in Kapitel 3 erwähnten Studien zur Flexibilisierung kommunaler ARAs [11–14] wird deutlich, dass die Auswahl der, im Rahmen der Studien untersuchten, Kläranlagen nicht genauer erläutert wird. Dies zeigt, dass derzeit noch keine Methodik veröffentlicht wurde, um festzustellen welche ARA-Konfiguration bzw. welche energietechnischen Charakteristika (siehe Kapitel 2.4) mit einer hohen Eignung zur Flexibilisierung verbunden sind. Es wird in den Studien darauf hingewiesen, dass eine hohe Energieeffizienz und die Integration ARA-interner Energieaufbringungseinheiten zu einem höheren Energieautarkiegrad (siehe Kapitel 5.2) beitragen und die Flexibilitätspotentiale positiv beeinflussen können. Zudem werden in den Studien diverse Anhaltspunkte geliefert, welche zur Auswahl der zur Flexibilisierung geeigneten Aggregate herangezogen werden können. Hier gilt es kurze Reaktionszeiten bei der Ab- und Zuschaltung (< 5 min) zu erwähnen, welche eine schnelle Reaktion auf Grenzwertabweichungen im Netz ermöglichen. [11–14] Des Weiteren lassen eine Abschaltdauer von mindestens 15 min und minimal verfügbare Leistungen  $\geq 5 \text{ kW}_{\text{el}}$  in Niederspannungsnetzen bzw.  $\geq 50 \text{ kW}_{\text{el}}$  in Mittelspannungsnetzen auf ein ausreichend hohes Flexibilitätspotential hoffen. [13] Hohe Volllaststunden und ausreichende Speicherkapazitäten für Klärschlamm, Faulgas und weitere Produktgase werden ebenfalls als positiv erachtet. [11–14] Dies macht deutlich, dass im ersten Schritt stationäre Analysen der energietechnischen Charakteristika kommunaler ARAs, wie z.B. der Leistung der elektrischen und thermischen ARA-Aggregate oder der elektrischen und thermischen Energieautarkiegrade, essenziell sind, um eine zur Flexibilisierung geeignete ARA-Konfiguration identifizieren zu können. ***Insbesondere wird die Hypothese aufgestellt, dass ein hoher Energieautarkiegrad, eine zur Flexibilisierung geeignete ARA-Konfiguration identifizieren kann. Weitere offene Forschungsfragen sind daher: Welche energietechnischen Charakteristika weisen unterschiedliche ARA-Konfigurationen auf? Und welche ARA-Konfigurationen weisen hohe elektrische Energieautarkiegrade auf und sind diese zur Flexibilisierung geeignet?***

Die in Kapitel 3 analysierten Studien zeigen zudem, dass die Flexibilisierung von kommunalen Abwasserreinigungsanlagen bisher hauptsächlich anhand spezifischer Anlagen untersucht wurde. Beispielsweise wird in Müller et al. [12] anhand drei spezifischer kommunaler ARAs untersucht, welches Potential zur Bereitstellung von Regelleistung zur Verfügung steht. Zudem erfolgt die Abschätzung der theoretischen und realisierbaren Flexibilitätspotentiale meist stationär auf Basis der Nennleistung der flexiblen Aggregate. Zeitlich aufgelöste Simulationen der Last- und Aufbringungsprofile, sowie der elektrischen Flexibilitätspotentiale werden nur begrenzt und spezialisiert vorgenommen. Die stationären, isolierten Betrachtungen können jedoch dazu führen, dass die Schlussfolgerungen nicht auf alle kommunalen ARAs übertragbar sind bzw. dass das Flexibilitätspotential nicht vollständig erhoben wird. In Schäfer et al. [11], erfolgt hingegen die Analyse der Flexibilisierung von Aggregaten und Prozessen anhand einer dynamischen Jahressimulationen einer spezifischen Kläranlage, sowie ohne Bezug auf vorherrschende Rahmenbedingungen am Energiemarkt. Die dabei entwickelten Datenblätter zu den Flexibilitätsparametern der flexiblen Lasten und Energieaufbringungseinheiten ermöglichen eine Abschätzung der stationären realisierbaren Flexibilitätspotentiale kommunaler Kläranlagen. Da jedoch zur Einsatzplanung von Flexibilitäten im elektrischen Netz zeitlich aufgelöste Last- und Aufbringungsprofile einer bereitstellenden ARA benötigt werden, erfordert die Übertragung der Studien-Erkenntnisse eine anlagenspezifische Simulation hinsichtlich der Profilverläufe und der damit verbundenen zeitlich aufgelösten theoretischen und realisierbaren Flexibilitätspotentiale. Eine Jahressimulation wäre zudem von Vorteil, um saisonale Unterschiede in der Kläranlagenbelastung und dem fluktuierenden erneuerbaren Energieaufkommen analysieren zu können. ***Dies wirft die offene Forschungsfrage auf, welche zeitlich aufgelösten Jahreslast- und -aufbringungsprofile kommunale ARAs unterschiedlicher Ausstattung aufweisen und welche zeitlich aufgelösten theoretischen Flexibilitätspotentiale damit verbunden sind.***

Des Weiteren gilt zu beachten, dass die spezifischen in den Studien untersuchten ARAs über keine dezentrale Klärschlammnutzung verfügen, obwohl diese gemäß aktueller Literatur an Attraktivität gewinnt (siehe Kapitel 2.3). Dies führt dazu, dass Aggregate zur thermischen Klärschlammverwertung in den Energie- und Flexibilitätsanalysen keine Berücksichtigung finden. Vor allem bei Konzepten zur Klärschlammverwertung die elektrische Energie als Output verzeichnen können, bietet die Einbindung eine Chance zur Erhöhung der Eigenproduktion, sowie der positiven und negativen Flexibilität. ***Daraus lässt sich die folgende offene Forschungsfrage ableiten: Wie beeinflussen dezentrale Aggregate zur Klärschlammnutzung die energietechnischen Charakteristika, sowie die theoretischen und realisierbaren Flexibilitätspotentiale einer kommunalen ARA?***

Der Einsatz von Flexibilitäten im elektrischen Netz wird in Schäfer et al. [11] anhand von Realtests und darauf basierenden zeitlich aufgelösten Simulationen einer spezifischen deutschen ARA untersucht. Dabei werden sowohl netzseitige als auch anlagenseitige Analysen durchgeführt, um mögliche Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb und die Auslastung des Netzstranges der ARA darzustellen. Dabei wird ein netzdienlicher Einsatz als geeigneter Einstieg in die Bereitstellung von Flexibilität erachtet, um lokal (Niederspannungsnetz) bzw. regional (Mittelspannungsnetz) Spannungsbandverletzungen (DIN EN 50160 [9]) zu vermeiden. Die Teilnahme an einer Erneuerbaren-Energiegemeinschaft gemäß dem Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz [5] bietet zudem die Möglichkeit netzdienliche Flexibilität zu vermarkten. Ein systemdienlicher Einsatz bietet eine weitere Vermarktungsoption. Hier werden der klare regulatorische Rahmen, sowie die Erlöse aus der Vorhaltung und Bereitstellung von systemdienlicher Flexibilität als positiv bewertet. Bei einem marktdienlichen Einsatz zur Generierung von Erlösen über den Handel an der Strombörse werden in Schäfer et al. [11] aktuell größere Hemmnisse als bei dem netz- und systemdienlichen Einsatz vermutet. Die Notwendigkeit von Bedarfs- und Marktpreisprognosen zur Vorhersage von Niedrig- und Hochpreisphasen, sowie ein komplexes Energiepooling sind als vorrangige Hürden erwähnbar. Details zu den Analysen können der Literatur [11] entnommen werden. Die Resultate der österreichischen Studien [13, 14] basieren nicht auf zeitlich aufgelösten Simulationen. Eine zeitlich aufgelöste Analyse der Interaktion mit dem elektrischen Netz unter Berücksichtigung von Flexibilitätsparametern (z.B. Abschalt Dauern oder Regenerationszeiten) und Speicherkapazitäten wurde nicht aufgezeigt. ***Welche zeitlich aufgelösten realisierbaren Flexibilitätspotentiale für den Einsatz im elektrischen Netz unter Berücksichtigung von Flexibilitätsparametern zur Verfügung stehen und wie sich ein netz- und systemdienlicher Einsatz auf die Energie- und Kostencharakteristika einer kommunalen ARA auswirken, sind daher weitere offene Forschungsfragen.***

## 4.2 Forschungsfrage

Auf Basis der offenen Forschungsfragen lässt sich die übergeordnete Forschungsfrage der vorliegenden Dissertation ableiten, welche folgendermaßen lautet:

***Welche zeitlich aufgelösten Last- und Aufbringungsprofile und damit verbundene zeitlich aufgelöste theoretische und realisierbare Flexibilitätspotentiale weisen kommunale ARAs mit und ohne integrierter thermischer Klärschlammverwertung auf, um als Flexibilitätsdienstleister im elektrischen Netz der Zukunft agieren zu können?***

### 4.3 Forschungsziel

Zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage wird in der vorliegenden Dissertation eine Application Software entwickelt, welche potenziellen Nutzern (Anlagenbetreiber, Netzbetreiber, Energieversorger etc.) die Ermittlung von zeitlich aufgelösten Last- und Aufbringungsprofilen, sowie theoretischen und realisierbaren Flexibilitätpotentialen kommunaler ARA-Konfigurationen ermöglicht. Zur Analyse der energietechnischen Charakteristika der ARA-Konfigurationen, insbesondere zur Identifikation von Konfigurationen mit hohem elektrischen und thermischen Energieautarkiegraden (siehe Kapitel 5.2), ermöglicht die Application Software vorab der zeitlich aufgelösten Flexibilitätsanalysen zudem stationäre Analysen auf Basis einer Massen- und Energiebilanzierung. Die Modellierung im Hintergrund der Anwendung baut auf dem derzeitigen Stand der Technik bzw. Forschung auf und fokussiert die energietechnische Betrachtung. Dieser Fokus soll eine schnelle Abschätzung von Flexibilitätpotentialen ermöglichen ohne im ersten Schritt eine zeit-, daten- und kostenintensive kalibrierte Simulation der Reinigungsprozesse zu benötigen. Auf Basis der Ergebnisse hinsichtlich der bereitstellbaren flexiblen Energiemengen, der dafür erforderlichen Speicherkapazitäten, sowie der damit verbundenen Auswirkungen auf die Energie- und Kostencharakteristika, kann eine erste Beurteilung der Eignung von diversen kommunalen ARA-Konfigurationen als Flexibilitätsbaustein erfolgen. Wird eine Flexibilisierung als möglich und positiv erachtet, können Anlagenbetreiber eine genaue anlagenspezifische Analyse der Einflüsse auf die Reinigungsprozesse und die Einhaltung der Ablaufgrenzwerte veranlassen. Dies soll vor allem für Anlagen- und Netzbetreiber, sowie Energieversorger die Komplexität reduzieren und dem Aufbau von Wissen dienen. Zusätzlich sollen im Modell Aggregate zur Klärschlammnutzung (siehe dazu Kapitel 2.3) integriert werden, um deren Einfluss auf die zeitlich aufgelösten Last- und Aufbringungsprofile, sowie die Flexibilitätpotentiale zu untersuchen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen Anlagenbetreiber bei Investitionsentscheidungen unterstützen und Netzbetreiber, sowie Energieversorger auf mögliche Veränderungen der Leistungsprofile vorbereiten. Das Modell soll zudem eine Untersuchung des Einsatzes von netz- und systemdienlicher Flexibilität im elektrischen Netz ermöglichen. Dies dient der Analyse der Interaktion mit dem elektrischen Netz, um damit verbundene Einflüsse auf die Kläranlage aufzeigen zu können. Zusammengefasst stellt sich das Hauptziel dieser Dissertation daher wie folgt dar:

***Entwicklung einer Application Software zur Ermittlung der zeitlich aufgelösten Jahreslast- und -aufbringungsprofile, und der damit verbundenen zeitlich aufgelösten theoretischen und realisierbaren Flexibilitätpotentiale von kommunalen ARAs mit und ohne integrierter thermischer Klärschlammverwertung, sowie zur Untersuchung des netz- und systemdienlichen Flexibilitätseinsatzes.***

Daraus lassen sich folgende **Teilziele hinsichtlich der Modellierung** der Application Software ableiten:

1. Erstellung eines stationären Massen- und Energiebilanzmodells des Systems „kommunale Abwasserreinigungsanlage“ (Mechanische Reinigung + Biologische Reinigung + Ergänzende Reinigung + Schlammbehandlung gemäß Kapitel 2.2.3)
2. Erstellung eines stationären Massen- und Energiebilanzmodells des erweiterten Systems „Energieverbund“ (System „kommunale ARA“ + Faulgas- und Klärschlammnutzungsaggregate gemäß Kapitel 2.3 und 2.4.3) inklusive der thermodynamischen Simulation des Klärschlammvergaserprozesses mittels Aspen Plus
3. Erstellung eines Steady-State-Simulationsmodells zur Ermittlung von zeitlich aufgelösten Jahreslast- und -aufbringungsprofilen, sowie zeitlich aufgelösten theoretischen Flexibilitätspotentialen
4. Erweiterung des Steady-State-Simulationsmodells zur Analyse des zeitlich aufgelösten realisierbaren Flexibilitätspotentials in netzdienlichen Szenarien
5. Erweiterung des Steady-State-Simulationsmodells zur Analyse des zeitlich aufgelösten realisierbaren Flexibilitätspotentials in systemdienlichen Szenarien
6. Validierung der Massen- und Energiebilanzmodelle, sowie des Steady-State-Simulationsmodells

Um die aufgezeigten offenen Forschungsfragen mit Hilfe der Application Software beantworten zu können, sind zudem folgende **Teilziele bezüglich der Durchführung von Analysen** zu nennen:

7. Ermittlung des elektrischen und thermischen Energieautarkiegrades diverser spezifizierter Energieverbunde kommunaler ARAs zur Identifikation und Auswahl von Energieverbunden mit hohen Energieautarkiegraden (Bezug zu Teilziel 1-2)
8. Ermittlung der zeitlich aufgelösten theoretischen elektrischen Flexibilitätspotentiale der ausgewählten Energieverbunde und Darstellung dieser in Form von Flexibilitätsbändern (Bezug zu Teilziel 3)
9. Ermittlung und Darstellung des realisierbaren Potentials der ausgewählten Energieverbunde als Flexibilitätsdienstleister in netzdienlichen Flexibilitätsszenarien (Bezug zu Teilziel 4)
10. Ermittlung und Darstellung des realisierbaren Potentials der ausgewählten Energieverbunde als Flexibilitätsdienstleister in systemdienlichen Flexibilitätsszenarien (Bezug zu Teilziel 5)

## 5 OPTIEVLEX – AUFBAU UND THEORETISCHER HINTERGRUND

**OPTIEVLEX** steht für „**Optimierte Energieverbunde kommunaler Abwasserreinigungsanlagen als Flexibilitätsdienstleister in den elektrischen Netzen der Zukunft**“ und ist eine, auf einer EXCEL-MATLAB-Co-Simulation [96, 97] basierte, Application Software. OPTIEVLEX dient der Ermittlung der zeitlich aufgelösten Last- und Aufbringungsprofile, sowie der damit verbundenen zeitlich aufgelösten theoretischen und realisierbaren Flexibilitätspotentiale von energietechnisch optimierten Energieverbunden kommunaler ARAs.

Der Begriff „**kommunale ARA**“ bezeichnet dabei in weiterer Folge ein System, welches wie im Stand der Technik erläutert (siehe Kapitel 2), eine ARA zur Reinigung kommunaler Abwässer mit dem Belebtschlammverfahren inkl. aerober oder anaerober Schlammstabilisierung abbildet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass über 95 % des kommunalen Abwassers im deutschsprachigen Raum (Deutschland, Österreich und Schweiz) mittels Anlagen dieser Art gereinigt wird [11, 19–21]. Somit umfasst das System alle Stand-der-Technik-Module der mechanischen, biologischen und ergänzenden Reinigung, sowie der Schlammbehandlung bis hin zur Entwässerung (siehe Kapitel 2.2.3).

Der Begriff „**Energieverbund**“ wird nachfolgend verwendet, um kommunale ARAs mit integrierten Faulgas- und Klärschlammnutzungsaggregaten gemäß Kapitel 2.3 und 2.4.3 zu beschreiben. Somit bezeichnet der Begriff ein System, welches neben den Modulen des Systems „kommunale ARA“, die Module „Faulgasnutzung“, „Trockner“ und „Klärschlammnutzung“ umfasst. Als „**energietechnisch optimierter Energieverbund**“ wird in weiterer Folge ein Energieverbund mit hohem elektrischen und thermischen Energieautarkiegraden (siehe Kapitel 5.2) betrachtet.

Die Systemgrenzen und inkludierten Module der Systeme „kommunale ARA“ und „Energieverbund“ werden für eine Belebungsanlage mit anaerober Schlammstabilisierung in Abbildung 5-1 dargestellt. Für eine Belebungsanlage mit aerober Schlammstabilisierung entfallen die Module „Vorklärbecken“, „Voreindicker“, „Faulturm“ und „Faulgasnutzung“. Die Module fassen jeweils die elektrischen und thermischen Aggregate bzw. Lasten, wie z.B. Gebläse oder Heizschlumpumpen, des spezifischen Reinigungs-, Behandlungs- oder Verwertungsschrittes zusammen. Die Module stehen über die Massenströme an Abwasser  $\dot{m}_{AW}$  und Schlamm Trockensubstanz (TS)  $\dot{m}_{TS,S}$  in Verbindung. Der Abwassermassenstrom  $\dot{m}_{AW}$  durchläuft die Module „Zulaufpumpwerk“ (ZPW), „Rechenanlage“ (RA), „Sand- & Fettfang“ (SFF), „Vorklärbecken“ (VKB), „Belebungsbecken“ (BB), „Phosphorelimination“ (PE), sowie „Nachklärbecken“ (NKB). Die einzelnen Module dienen der Abtrennung von Schmutzfrachten. So erfolgt beispielsweise im Modul „Rechenanlage“ die Abtrennung des Rechengutmassenstromes  $\dot{m}_{TS,RG}$  was zu einem veränderten Abwassermassenstrom nach

der Rechanlage  $\dot{m}_{AW,nRA}$  führt. Die Massenströme an Rezirkulationsschlamm (RZS)  $\dot{m}_{TS,RZS}$  und Rücklaufschlamm (RLS)  $\dot{m}_{TS,RLS}$  verbleiben in der biologischen Reinigungsstufe, während die Massenströme an Primärschlamm (PS)  $\dot{m}_{TS,PS}$ , Sekundärschlamm (SS)  $\dot{m}_{TS,SS}$  und Tertiärschlamm (TTS)  $\dot{m}_{TS,TTS}$  der Schlammbehandlung zugeführt werden. Im Zuge der Schlammbehandlung werden die Massenströme zu einem Nutzschlammstrom  $\dot{m}_{TS,NS}$  zusammengeführt. Die Schlammbehandlung umfasst die Module „Voreindicker“ (VED), „Faulturm“ (FT), „Eindicker“ (ED) und „Entwässerung“ (E). Die Produkte der Schlammbehandlung, das Faulgas  $\dot{m}_{FG}$  und der Nutzschlamm nach Entwässerung  $\dot{m}_{TS,NSnE}$ , werden den Modulen „Faulgasnutzung“ (FGN), „Trockner“ (T) und/oder „Klärschlammnutzung“ (KSN) zugeführt. Die Massenströme die die Systemgrenzen verlassen werden einer externen Behandlung, Verwertung oder Deponierung zugeführt. Dazu zählen die Massenströme an Rechengut  $\dot{m}_{TS,RG}$ , Sand  $\dot{m}_{TS,S}$ , Fett  $\dot{m}_F$  und Asche  $\dot{m}_{TS,A}$ . Ein Massenstrom an Co-Substraten  $\dot{m}_{TS,CS}$  kann dem System zugeführt werden.

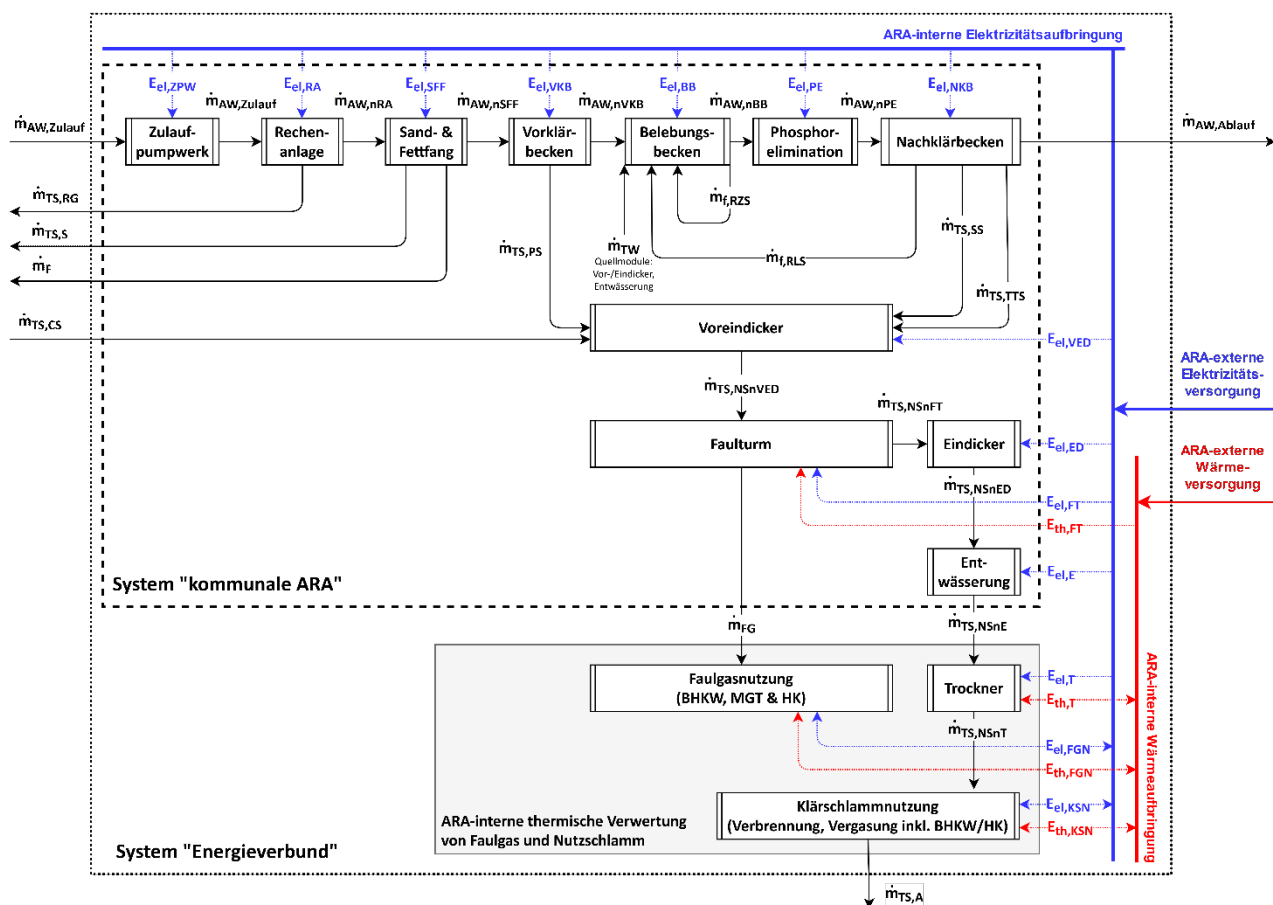


Abbildung 5-1: Systemgrenzen und Module der Systeme „kommunale ARA“ und „Energieverbund“ als Basis für die stationären Massen- und Energiebilanzmodelle in OPTIEVLEX

Der Bedarf an elektrischer Energie  $E_{el}$  für die einzelnen Module wird in Abbildung 5-1 in Form von blauen punktierten Pfeilen dargestellt. Ein Bedarf an thermischer Energie  $E_{th}$  wird durch rote punktierte Pfeile gekennzeichnet. Da die Module „Faulgasnutzung“, „Trockner“, sowie „Klärschlammnutzung“ auch elektrische und thermische Energie bereitstellen können, weisen diese Module Doppelpfeile auf. Kann der elektrische und/oder thermische Energiebedarf nicht mittels ARA-interner Aggregate aufgebracht werden, wird Energie aus ARA-externen Versorgungseinheiten zugeführt.

Die in Abbildung 5-1 illustrierten Systeme und inkludierten Module bilden die Basis von OPTIEVLEX. Um einen ersten Einblick in die darauf aufbauenden EXCEL- und MATLAB-Modelle, sowie deren Anwendungsoptionen zu erhalten, wird auf Kapitel 5.1 verwiesen. Kapitel 5.2 dient der Definition der Kennzahlen, welche im Rahmen von OPTIEVLEX Einsatz finden. Kapitel 5.3 bis 5.7 liefern detaillierte Informationen zum Aufbau und theoretischen Hintergrund von OPTIEVLEX. Die Validierungsmaßnahmen sind dem Kapitel 5.8 zu entnehmen.

### 5.1 Überblick zum Aufbau der Application Software OPTIEVLEX

Kapitel 5.1 ermöglicht einen Überblick zu den Modellierungsschritten zum Aufbau von OPTIEVLEX, die dabei entstehenden Teilmodelle, sowie die Anwendungsoptionen der Teilmodelle für potenzielle Nutzer. Der Überblick dient dazu die detaillierten Informationen zu den Modellierungsschritten und Teilmodellen inklusive des theoretischen Hintergrundes in Kapitel 5.3 bis 5.7 besser einordnen zu können. Zudem wird ein Überblick zu den in OPTIEVLEX möglichen Nutzerspezifikationen, im Sinne einer Verwendung der Dissertationsschrift als Nutzerhandbuch, erläutert. Details dazu sind ebenfalls in Kapitel 5.3 bis 5.7 zu finden.

#### 5.1.1 Modellierungsschritte zum Aufbau von OPTIEVLEX

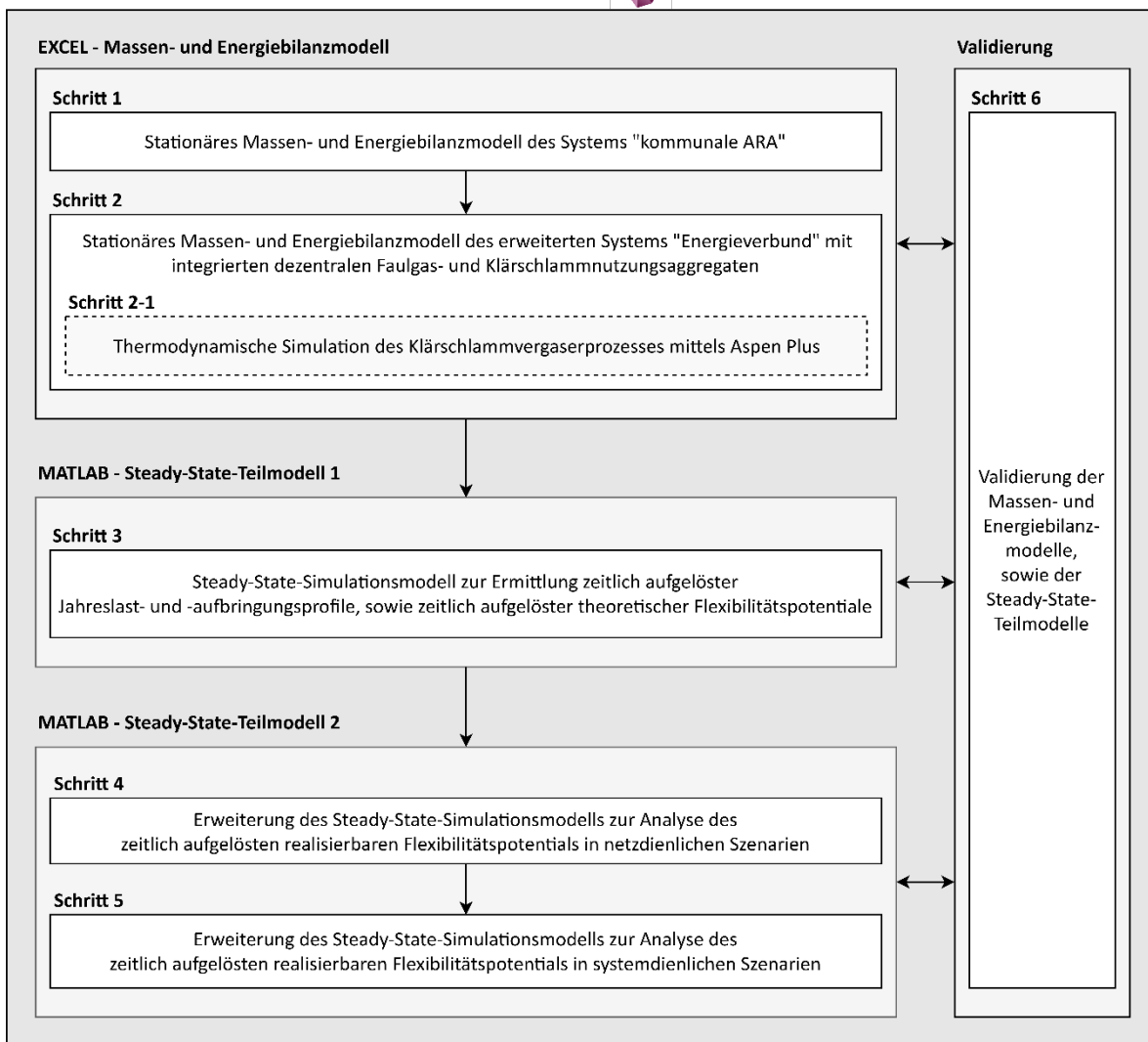
Der Aufbau der Application Software OPTIEVLEX erfolgte sequenziell gemäß der Teilziele 1 - 6 (siehe Kapitel 4.3). Die dafür getätigten Modellierungsschritte zeigt Abbildung 5-2.

##### SCHRITT 1: STATIONÄRES MASSEN- UND ENERGIEBILANZMODELL DES SYSTEMS „KOMMUNALE ARA“

Schritt 1 beinhaltet die Erstellung des stationären Massen- und Energiebilanzmodells des Systems „kommunale ARA“ mittels EXCEL [96], welches die Module und Ströme gemäß Abbildung 5-1 umfasst. Ziel des ersten Modellierungsschrittes ist die Ermittlung der stationären energietechnischen Charakteristika der einzelnen Module, sowie des Systems „kommunale ARA“. Der Begriff „**stationäre energietechnische Charakteristika**“ umfasst im Rahmen der stationären Modelle die jährliche mittlere elektrische und thermische Leistung, den jährlichen mittleren elektrischen und thermischen Energiebedarf, sowie die elektrischen und thermischen Energieautarkiegrade des Systems (siehe Kapitel 5.2.1). Details zum Modellierungsschritt 1 sind dem Kapitel 5.3 zu entnehmen.



**OPTIEVLEX** 



**Abbildung 5-2: Modellierungsschritte zum Aufbau der Application Software OPTIEVLEX**

**SCHRITT 2: STATIONÄRES MASSEN- UND ENERGIEBILANZMODELL DES SYSTEMS "ENERGIEVERBUND"**

In Schritt 2 erfolgt die Erweiterung des stationären Massen- und Energiebilanzmodells des Systems „kommunale ARA“ mittels EXCEL [96], um die stationären Massen- und Energiebilanzen der Module „Faulgasnutzung“, „Trockner“ und „Klärschlammnutzung“ (siehe Abbildung 5-1). Das erweiterte stationäre Massen- und Energiebilanzmodell des Systems „Energieverbund“ bildet damit die ARA-interne Verwertung der erneuerbaren Energieträger, Faulgas und Nutzschlamm, ab. Um eine ausreichende Datengrundlage zur Erstellung der stationären Massen- und Energiebilanz der Klärschlammvergasung zu gewährleisten, wurde eine thermodynamische Simulation des Vergasungsprozesses mittels Aspen Plus [98] vorgenommen. Ziel des Modellierungsschrittes ist die Ermittlung der stationären energietechnischen Charakteristika (siehe Schritt 1) der erweiterten Module, sowie des Systems „Energieverbund“. Die Details zu den Modellierungsschritten 2 und 2-1 sind in Kapitel 5.4 und 5.5 zu finden.

### SCHRITT 3: ERSTELLUNG EINES STEADY-STATE-SIMULATIONSMODELLS ZUR ERMITTLUNG VON ZEITLICH AUFGELÖSTEN JAHRESLAST- UND -AUFBRINGUNGSPROFILIEN, SOWIE ZEITLICH AUFGELÖSTEN THEORETISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENTIALEN

Das Ziel des Modellierungsschrittes 3 ist, ein Modell zur Ermittlung von zeitlich aufgelösten Jahreslast- und -aufbringungsprofilen, sowie zeitlich aufgelösten theoretischen Flexibilitätspotentialen von Energieverbunden kommunaler ARAs zu entwickeln. Zur Erstellung zeitlich aufgelöster Leistungsprofile wird in Schritt 3 ein Steady-State-Simulationsmodell mittels MATLAB erstellt, welches das stationäre Massen- und Energiebilanzmodell des Systems „Energieverbund“ mit zeitlich aufgelösten Jahreszulauf- und -konzentrationsprofilen für kommunale ARAs, sowie Betriebszeiten der im System „Energieverbund“ inkludierten Module verknüpft (siehe Abbildung 5-1). Zudem werden im Rahmen des Modellierungsschrittes die flexiblen Aggregate zur Ermittlung des zeitlich aufgelösten theoretischen Flexibilitätspotentials identifiziert. Die zeitlich aufgelösten Jahreslast- und -aufbringungsprofile der flexiblen Aggregate dienen als Basis, um die zeitlich aufgelösten theoretischen Flexibilitätspotentiale darstellen zu können. Nähere Informationen zum Modellierungsschritt 3 sind in Kapitel 5.6 nachlesbar.

### SCHRITT 4 UND 5: ERWEITERUNG DES STEADY-STATE-SIMULATIONSMODELLS ZUR ANALYSE DES ZEITLICH AUFGELÖSTEN REALISIERBAREN FLEXIBILITÄTSPOTENTIALS IN NETZ- UND SYSTEMDIENLICHEN SZENARIEN

In Schritt 4 und 5 erfolgt eine Erweiterung des MATLAB-Steady-State-Simulationsmodells, um eine Szenario-basierte Simulation des netz- und systemdienlichen Einsatzes von Flexibilitäten zu ermöglichen. Die Modellerweiterung verbindet zeitlich aufgelöste jährliche Bedarfsprofile für netz- und systemdienliche Flexibilität mit den zeitlich aufgelösten theoretischen Flexibilitätspotentialen des Energieverbundes, die mittels dem in Schritt 3 entwickeltem Modell ermittelt werden. Dabei wird unter Berücksichtigung der Flexibilitätsparameter der flexiblen Aggregate (siehe Tabelle 10-1, S.215), der anlagenspezifischen Speicherkapazitäten und der Bedarfsprofile das zeitlich aufgelöste realisierbare Flexibilitätspotential je Szenario ermittelt. Die Szenarien werden im Rahmen der Schritte 4 und 5 definiert und ermöglichen, dass der Einsatz von unterschiedlichen Kombinationen aus flexiblen Lasten und Energieaufbringungseinheiten zur Bereitstellung von netz- und systemdienlicher Flexibilität analysiert wird. Detaillierte Informationen sind dem Kapitel 5.7 zu entnehmen.

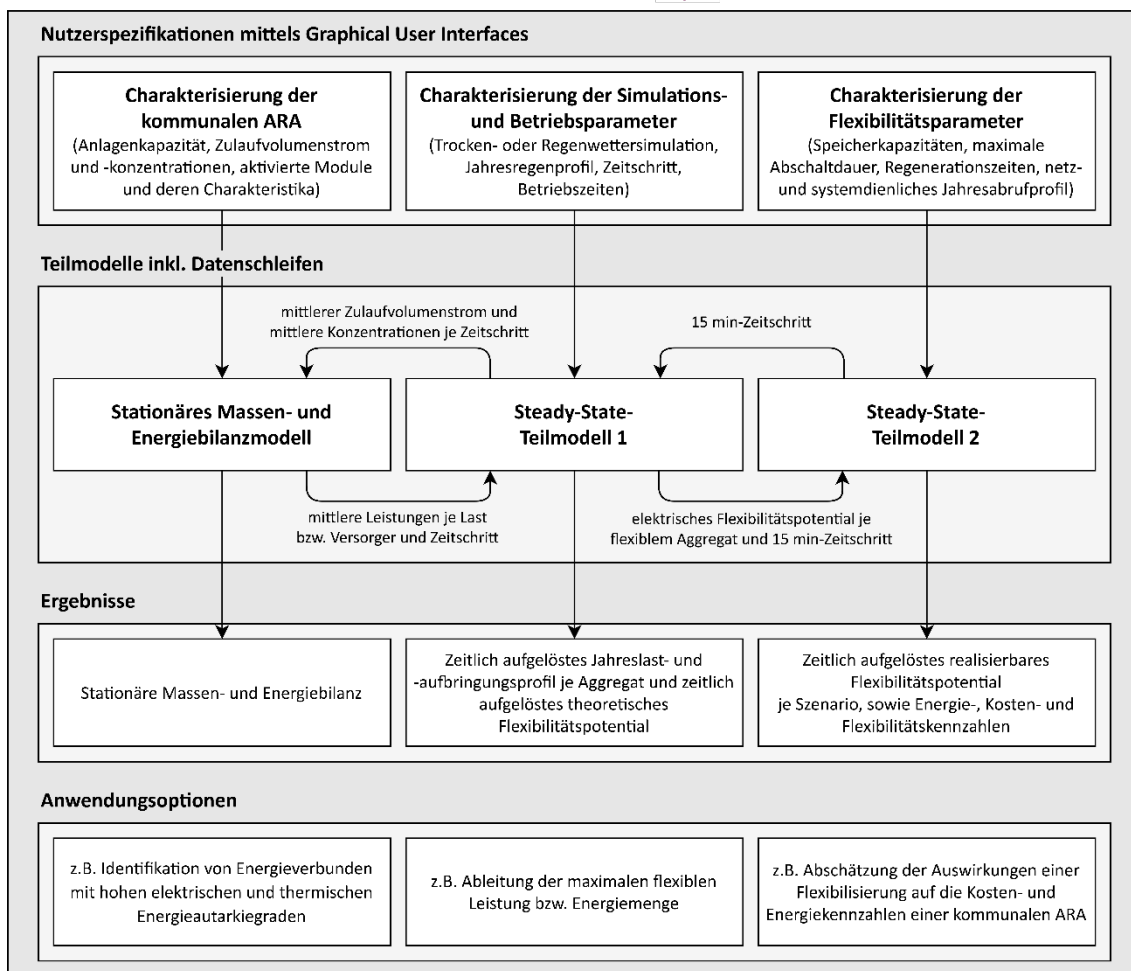
### SCHRITT 6: VALIDIERUNG VON OPTIEVLEX

Um eine ausreichende Genauigkeit der Modellierung gewährleisten bzw. Unsicherheiten quantifizieren zu können, wird in Schritt 6 eine Validierung vorgenommen. Details dazu sind in Kapitel 5.8 ersichtlich.

### 5.1.2 Teilmodelle von OPTIEVLEX und deren Anwendungsoptionen für potenzielle Nutzer

Abbildung 5-2 zeigt neben den Modellierungsschritten bereits die daraus resultierenden Teilmodelle von OPTIEVLEX. Die in Schritt 1 und 2 mittels EXCEL erstellten stationären Modelle bilden das stationäre Massen- und Energiebilanzmodell. Das in Schritt 3 mittels MATLAB entwickelte Steady-State-Modell, stellt das Steady-State-Teilmodell 1 dar, während die in Schritt 4 und 5 vorgenommenen Erweiterungen das Steady-State-Teilmodell 2 bilden. Die Auftrennung in zwei Steady-State-Teilmodelle wurde vorgenommen, da eine Nutzung des Steady-State-Teilmodells 1 nicht eine Nutzung des Steady-State-Teilmodells 2 bedingt. Die Teilmodelle sind, wie in Abbildung 5-3 ersichtlich, über Datenschleifen verbunden und bieten potenziellen Nutzern Spezifikationsmöglichkeiten, sowie gewisse Anwendungsoptionen zur Untersuchung von Energieverbunden kommunaler ARAs. Die Zusammenhänge zwischen den Teilmodellen, sowie die Nutzerspezifikationen und Anwendungsoptionen der Teilmodelle werden nachfolgend kurz erläutert.

## OPTIEVLEX



**Abbildung 5-3: Überblick zu den Teilmodellen von OPTIEVLEX inkl. der möglichen Nutzerspezifikationen, der verbindenden Datenschleifen, sowie der potenziellen Ergebnisse und Anwendungsoptionen**

### 5.1.2.1 Stationäres Massen- und Energiebilanzmodell

Das stationäre Massen- und Energiebilanzmodell bildet die Basis von OPTIEVLEX und dient der Ermittlung der jährlichen mittleren Massen- und Energieströme der Systeme „kommunale ARA“ und „Energieverbund“ (siehe Abbildung 5-1). Zudem können in Verbindung mit dem Steady-State-Teilmodell 1 die mittleren Massen- und Energieströme je Zeitschritt für die Flexibilitätsanalysen berechnet werden. Diese stellen in weiterer Folge die Grundlage zur Ermittlung der zeitlich aufgelösten Jahreslast- und –aufbringungsprofile, sowie der darauf basierenden zeitlich aufgelösten theoretischen und realisierbaren Flexibilitätspotentiale dar. Die dem Massen- und Energiebilanzmodell hinterlegten Berechnungsansätze werden zur Bemessung und energietechnischen Analyse von Belebungsanlagen eingesetzt. Besonders hervorzuheben sind die Ansätze gemäß den Arbeits- und Merkblättern der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), welche zur Auslegung von kommunalen ARAs in Deutschland Verwendung finden. [17, 30, 31, 52, 74, 99]

Um Energieverbunde mit unterschiedlichem Aufbau analysieren zu können, bietet OPTIEVLEX die Möglichkeit die Module des Energieverbundes über ein Graphical User Interface zu aktivieren bzw. zu deaktivieren. Die aktivierten Module können zudem z.B. hinsichtlich der inkludierten Aggregate spezifiziert werden. Detaillierte Informationen zu erforderlichen und optionalen Nutzerspezifikationen sind in den Kapiteln 5.3 bis 5.5 ersichtlich. Die aus der Massen- und Energiebilanz des spezifizierten Energieverbundes ableitbaren stationären energietechnischen Charakteristika können unter anderem zur Identifikation von energietechnisch optimierten Energieverbunden herangezogen werden. Zudem kann anhand der mittleren Leistung der Aggregate und deren Volllaststunden eine erste Vorauswahl an flexiblen Aggregaten getroffen werden.

### 5.1.2.2 Steady-State-Teilmodell 1

Das Steady-State-Teilmodell 1 baut auf dem stationären Massen- und Energiebilanzmodell auf und verbindet dieses, zur Erstellung zeitlich aufgelöster Jahreslast- und -aufbringungsprofile, mit zeitlich aufgelösten Jahreszulauf- und -konzentrationsprofilen für kommunale ARAs, sowie mit Betriebszeiten der im Energieverbund inkludierten Module. Die dafür erforderlichen Datenschleifen sind in Abbildung 5-3 ersichtlich. Die zeitlich aufgelösten Jahreszulauf- und -konzentrationsprofile basieren auf einem Ansatz gemäß Langergraber et al. [100] welcher mit nutzerspezifischen Jahresregenprofilen verknüpft wird. Details zum Zulaufmodell sind Kapitel 5.6.3 zu entnehmen. Aus den zeitlich aufgelösten Jahreszulauf- und -konzentrationsprofilen werden im Zuge der Datenschleife 1 je nach nutzerspezifiziertem Zeitschritt (z.B. alle 15 min) der Zulaufvolumenstrom, sowie die Konzentrationen entnommen, und in das stationäre Massen- und Energiebilanzmodell eingesetzt. Dies dient der Berechnung

der mittleren elektrischen und thermischen Leistungen je Aggregat und Zeitschritt, welche über die Datenschleife 2 dem Steady-State-Teilmodell 1 übergeben werden. Die mittleren Leistungen führen je nach nutzerspezifischen Betriebszeiten der Aggregate zeitlich angeordnet zu einem Jahreslast- und -aufbringungsprofil je Aggregat. Zudem werden die mittleren Massenströme je Zeitschritt über die Datenschleife 2 rückgeführt, um die Speicherung von Nutzschlamm, Faulgas und anderen Produktgasen modellieren zu können. Die zeitlich aufgelösten Jahreslast- und -aufbringungsprofile der flexiblen Aggregate dienen in weiterer Folge als Basis, um die zeitlich aufgelösten theoretischen Flexibilitätspotentiale des Energieverbundes darstellen zu können. Detaillierte Ausführungen sind im Kapitel 5.6 ersichtlich. Das Steady-State-Teilmodell 1 kann unter anderem zur Ermittlung der elektrischen Leistung und der jährlichen flexiblen Energiemenge je flexiblem Aggregat verwendet werden.

### *5.1.2.3 Steady-State-Teilmodell 2*

Das Steady-State-Teilmodell 2 basiert auf den bisher erläuterten Modellen und verknüpft zeitlich aufgelöste jährliche Bedarfsprofile für netz- und systemdienliche Flexibilität mit den zeitlich aufgelösten theoretischen Flexibilitätspotentialen aus dem Teilmodell 1. Die Verknüpfung ist in Abbildung 5-3 als Datenschleife 3 dargestellt und dient dem Abruf des theoretischen Flexibilitätspotentials je 15 min-Zeitschritt, um das realisierbare Potential ermitteln zu können. Das realisierbare Flexibilitätspotential je 15 min-Zeitschritt ist der Anteil des theoretischen Potentials, der unter Berücksichtigung der Bedarfsprofile, sowie der Flexibilitätsparameter der flexiblen Aggregate und der Speicherkapazitäten bereitgestellt werden kann. Die Flexibilitätsparameter (siehe Tabelle 10-1, S.215) werden aus dem Stand der Forschung abgeleitet [11–14, 92] und können nutzerspezifisch definiert werden. Das realisierbare Potential je Zeitschritt und Szenario dient als Basis für die Berechnung der in Kapitel 5.2 beschriebenen Kennzahlen. Detaillierte Informationen zu dem Steady-State-Teilmodell 2 sind dem Kapitel 5.7 zu entnehmen. Anhand der Ergebnisse des Teilmodells 2 können unter anderem die Auswirkungen einer Flexibilisierung auf die Energie- und Kostencharakteristika des untersuchten Energieverbundes abgeschätzt werden. Es gilt zu beachten, dass für die Szenario-basierten Simulationen mittels dem Teilmodell 2 15 min-Zeitschritte erforderlich sind, da weiterführende Untersuchungen im Bereich der Stromnetzanalytik eine zeitliche Auflösung dieser Tiefe bedingen. Bei geplanter Nutzung des Teilmodells 2 ist im Teilmodell 1 eine zeitliche Auflösung von 15 min-Schritten zu wählen.

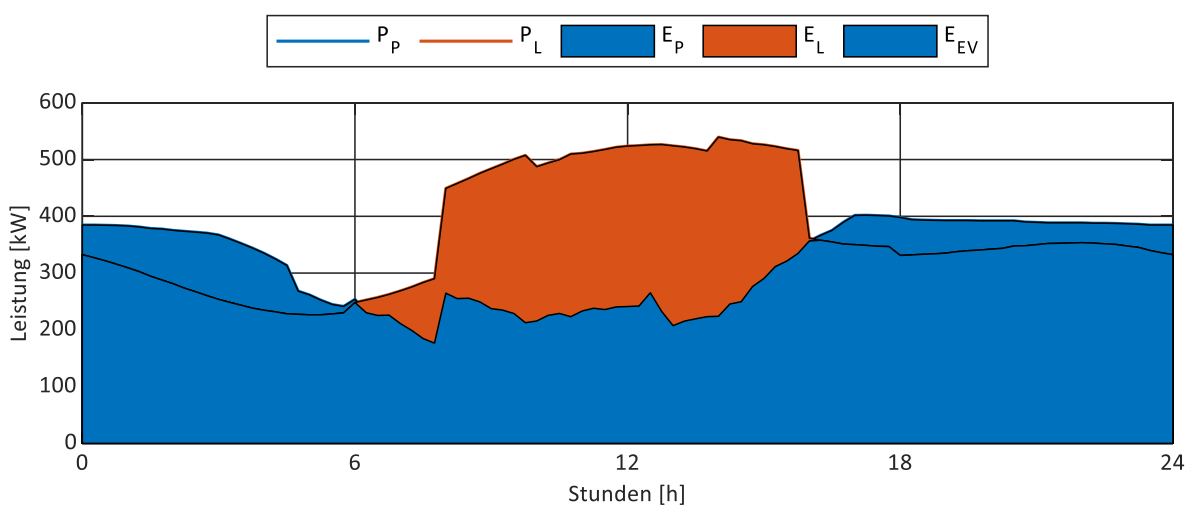
Die Simulationsdauer bei Nutzung des stationären Massen- und Energiebilanzmodells beträgt je nach Hardwareausstattung rund 5 Minuten. Wird zudem das Steady-State-Teilmodell 1 verwendet, ist mit einer Simulationsdauer von rund 15 Minuten zu rechnen. Eine vollständige Analyse inklusive des Einsatzes des Steady-State-Teilmodells 2 nimmt eine Simulationsdauer von rund 30 Minuten in Anspruch.

## 5.2 Definition der Kennzahlen zum Vergleich der Energieverbunde und Szenarien

Um die Energieverbunde kommunaler ARAs, sowie die netzdienlichen und systemdienlichen Szenarien (siehe Kapitel 5.7.4) charakterisieren und bewerten zu können, wird ein Satz von Kennzahlen herangezogen. Die im Rahmen der Modellierung verwendeten Energie-, Kosten- und Flexibilitätskennzahlen dienen dazu unterschiedliche Energieverbunde und Szenarien zu vergleichen, die für die Forschungsfrage relevantesten Verbunde zu identifizieren, deren Flexibilitätspotentiale zu beurteilen und den Flexibilitätseinsatz im elektrischen Netz zu bewerten.

### 5.2.1 Energiekennzahlen

Abbildung 5-4 zeigt ein exemplarisches Tageslast- und -aufbringungsprofil einer kommunalen ARA mit 100.000 EW. Hier stellt  $P_p(t)$  (blaue Linie) die Leistung dar, die mittels ARA-interner Energieaufbringungseinheiten bereitgestellt wird. Die dazugehörige Fläche (hellblau inkl. dunkelblau überlagert) repräsentiert die aufgebrauchte elektrische Energiemenge  $E_p$ .  $P_L(t)$  (rote Linie) bezeichnet den elektrischen Leistungsbedarf der kommunalen ARA, während die Fläche unter der Kurve (hellrot inkl. dunkelblau überlagert) die benötigte elektrische Energiemenge  $E_L$  über den Tag ergibt. Zudem wird im Diagramm die aufgebrauchte elektrische Energiemenge  $E_{EV}$  (dunkelblaue Fläche) aufgezeigt, die direkt zur Deckung des Bedarfs herangezogen werden kann. Der Satz an Energiekennzahlen kann auf Basis der Leistungen und Energiemengen ermittelt werden und umfasst den Energie- und Leistungsautarkiegrad, sowie den Eigenverbrauchsanteil. [101]



**Abbildung 5-4: Exemplarisches elektrisches Leistungs- und Energiebedarf einer kommunalen ARA, sowie exemplarische ARA-intern aufgebrauchte elektrische Leistung und Energiemenge**

Zur Ermittlung des Energieautarkiegrads (EAG) wird die im Betrachtungszeitraum aufgebrauchte Energiemenge  $E_P$  der benötigten Energiemenge  $E_L$  gegenübergestellt. Liegt ein EAG von 100 % vor, ist die kommunale ARA bilanziell autark. Dies bedeutet, dass sich Energieangebot und -nachfrage auf der Anlage über den jeweiligen betrachteten Zeitraum hinweg ausgleichen. Der EAG kann auch Werte über 100% annehmen, womit eine bilanzielle Überdeckung vorliegen würde. Der EAG wird anhand der Formel (5-1) berechnet.

$$EAG = \frac{E_P}{E_L} * 100\% = \frac{\int_{t_{Start}}^{t_{Ende}} P_P(t) dt}{\int_{t_{Start}}^{t_{Ende}} P_L(t) dt} * 100\% \quad (5-1)$$

Bei dem Leistungsautarkiegrad (LAG) wird jene aufgebrauchte Energiemenge  $E_{EV}$ , die direkt zur Bedarfsdeckung verwendet werden kann und die benötigte Energiemenge  $E_L$  zueinander in Verhältnis gebracht. Der LAG kann Werte von 0-100 % annehmen. Ein Wert von 100 % bedeutet, dass der gesamte Bedarf zu jedem Zeitpunkt mittels ARA-interner Energieaufbringung gedeckt werden kann. Liegen Werte unter 100 % vor, können eine an den Lastgang angepasste Aufbringung oder Speicheroptionen den LAG durch bedarfsgerechte Energiebereitstellung erhöhen. Die Formel (5-2) wird zur Berechnung herangezogen.

$$LAG = \frac{E_{EV}}{E_L} * 100\% = \frac{\int_{t_{Start}}^{t_{Ende}} \min\{P_L(t), P_P(t)\} dt}{\int_{t_{Start}}^{t_{Ende}} P_L(t) dt} * 100\% \quad (5-2)$$

Der Eigenverbrauchsanteil (EV) dient dem Vergleich der Energiemengen  $E_{EV}$  und  $E_P$ . Die Kennzahl nimmt ebenfalls nur Werte von 0-100 % an. Ein EV von 100 % zeigt, dass die gesamte intern bereitgestellte Energie selbst genutzt und zu keinem Zeitpunkt Leistung in das Netz eingespeist wird. Auch hier können eine angepasste Aufbringung oder Speicheroptionen Werte < 100 % erhöhen. Die Ermittlung erfolgt anhand der Formel (5-3).

$$EV = \frac{E_{EV}}{E_P} * 100\% = \frac{\int_{t_{Start}}^{t_{Ende}} \min\{P_L(t), P_P(t)\} dt}{\int_{t_{Start}}^{t_{Ende}} P_P(t) dt} * 100\% \quad (5-3)$$

## 5.2.2 Kostenkennzahlen

Die Kostenkennzahlen dienen in erster Linie dazu, die monetären Auswirkungen einer Flexibilisierung zu bewerten. Da die Flexibilisierung von ARAs aufgrund einer veränderten Energiebedarfs- und -aufbringungssituation vor allem die Energiekosten beeinflusst, werden mittels OPTIEVLEX die jährlichen variablen Betriebskosten für zugekaufte elektrische und thermische Energie für eine monetäre Bewertung berechnet. Zudem werden die jährlichen Entsorgungskosten für die Rückstände aus dem Reinigungsprozess ermittelt, um den Einfluss einer Integration von thermischen Verwertungsaggregaten aufzuzeigen. Um für eine Integration notwendige Anlagenerweiterungen oder -anpassungen quantifizieren zu können werden außerdem Abschätzungen zu den zu erwartenden jährlichen Investitionsausgaben und den fixen Betriebskosten getroffen. Kosten für chemische Zusätze im Reinigungsprozess werden nicht berücksichtigt, da hier angenommen wird, dass diese zum Erhalt der Reinigungsleistung nicht reduziert werden können. Ursprünglich vorhandene Kapital-, Betriebs- und Verwaltungskosten werden ebenfalls als konstant betrachtet. [68]

### 5.2.2.1 Variable Betriebskosten ( $Opex_{variabel}$ )

Die Ermittlung der jährlichen Kosten für zugekaufte elektrische ( $el$ ) und thermische ( $th$ ) Energie  $KeE$  erfolgt mit den Formeln (5-4) und (5-5). Wobei  $NB$  die aus dem Netz bezogene Energiemenge und  $PreE$  den dafür bezahlten Preis bezeichnet. Der Netzbezug wird mit Hilfe des Simulationsmodells für die untersuchten Energieverbunde und Szenarien berechnet und ergibt sich aus der Subtraktion der Energiemengen  $E_L$  und  $E_{EV}$  (siehe dazu Kapitel 5.2.1). Der Preis für Elektrizität und Wärme kann im Rahmen des Simulationsmodells nutzerspezifisch berücksichtigt werden. Ist kein nutzerspezifischer Preis bekannt, werden statistische Preise je nach simuliertem Jahresbedarf herangezogen. Die Strompreise für Nicht-Haushaltskunden liegen in Österreich 2019 je nach Jahresbedarf und Netzebene zwischen neun und 20 Cent pro kWh. [102] Im Durchschnitt sind Strombezugskosten von 11,5 Cent pro kWh<sub>el</sub> charakteristisch, was auch Untersuchungen der Technischen Universität Wien [68] bestätigen. Die Grundlage zur Ermittlung der Kosten für thermische Energie stellt der Erdgaspreis dar. Die Erdgaspreise für Nicht-Haushaltskunden liegen in Österreich 2019 je nach Jahresbedarf und Netzebene zwischen drei und neun Cent pro kWh<sub>th</sub>. [103] Tabelle 10-3 und Tabelle 10-4 zeigen eine detaillierte Aufstellung der Strom- und Erdgaspreise nach Jahresbedarf für 2019 (siehe Anhang S.217).

$$KeE_{el} = NB_{el} * PreE_{el} = (E_{L,el} - E_{EV,el}) * PreE_{el} \quad (5-4)$$

$$KeE_{th} = NB_{th} * PreE_{th} = (E_{L,th} - E_{EV,th}) * PreE_{th} \quad (5-5)$$



Die jährlichen Entsorgungskosten für Nutzschlamm  $K_{E,NS}$  und Nutzschlammasche  $K_{E,A}$  werden gemäß den Formeln (5-6) und (5-7) ermittelt und beinhalten die Abgabe- und Transportkosten. Die Abgabekosten werden auf Basis des trockenen Massenstromes  $\dot{m}_{TS}$  und dem Abgabepreis pro Tonne Trockensubstanz (TS)  $Pr_E$  berechnet. Die Transportkosten basieren im Falle des Nutzschlammes auf dem feuchten Massenstrom, welcher über den trockenen Massenstrom und den Trockengehalt  $TG$  ermittelt wird. Im Falle der Asche wird der trockene Massenstrom als Berechnungsgrundlage herangezogen.  $Pr_T$  bezeichnet den Preis für den Transport. Für die Abgabe von Nutzschlamm sind je nach Entsorgungspfad Preise von 80 – 500 € pro Tonne TS charakteristisch. Daher wird für die Simulationen ein durchschnittlicher Preis von 290 € angenommen. Da die Asche nicht nur deponiert, sondern auch landwirtschaftlich genutzt werden kann, orientiert sich der Preis für die Ascheentsorgung an den Kosten für einen landwirtschaftlichen Behandlungsweg. Diese liegen in Österreich zwischen 80 und 200 € pro Tonne TS, womit ein durchschnittlicher Preis von 140 € für die Simulationen berücksichtigt wird. [38] Der Transportpreis wird für eine Tonne feuchten Schlamm bzw. trockene Asche mit  $0,20 \text{ €km}^{-1}$  festgelegt. [49] Der Transportweg wird anhand der für die Länder Niederösterreich [49] und Steiermark [104] abgeschätzten Entfernungen von kommunalen ARAs zu Entsorgungs- und Verwertungsstellen definiert. Es wird angenommen, dass eine mittlere Entfernung von 50 km zur nächsten Entsorgungs- bzw. Verwertungsstelle vorliegt. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, wird diese Entfernung für alle Szenarien und Anlagenkonfigurationen in OPTIEVLEX hinterlegt.

$$K_{E,NS} = \dot{m}_{TS,NS} * Pr_{E,NS} + \dot{m}_{TS,NS} * \left( \frac{100\%}{TG_{NS}} \right) * Pr_T * 50 \quad (5-6)$$

$$K_{E,A} = \dot{m}_{TS,A} * Pr_{E,A} + \dot{m}_{TS,A} * Pr_T * 50 \quad (5-7)$$

### 5.2.2.2 Investitionsausgaben (Capex)

Die jährlichen Investitionsausgaben *Capex* werden auf Basis der Investitionskosten  $I$ , der Nutzungsdauer  $ND$  und des Fremdkapitalzinssatzes  $i$  über die Annuitätenmethode gemäß Formel (5-8) abgeschätzt. [105]

$$Capex = I * Annuitätenfaktor = \frac{(1 + i)^{ND} * i}{(1 + i)^{ND} - 1} \quad (5-8)$$

Die in Tabelle 5-1 dargestellten Investitionskosten für einzelne Aggregate bzw. Verfahrenskonzepte dienen der Berechnung der gesamten Investitionskosten  $I$ . Dafür erfolgt eine Kumulierung der Kosten für Einzelaggregate je nach ausgewähltem Energieverbund. Tabelle 5-1 beinhaltet die Kosten für die Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), welche zur Interaktion mit dem elektrischen Netz benötigt wird. Zudem werden die Kosten für Aggregate zur Klärschlamm-trocknung und -nutzung, sowie zur Gasspeicherung (z.B. für Faulgas oder Produktgas aus dem Vergaserprozess) berücksichtigt. Die Kosten entstammen teilweise der Literatur, wobei die Literaturquellen in der Tabelle 5-1 ersichtlich sind. Bei fehlender Verfügbarkeit an Literaturdaten, werden Herstelleranfragen zur Abschätzung der Investitionskosten herangezogen. Hier gilt zu beachten, dass die Kosten Richtwerte darstellen, da sich die Investitionskosten bei Integration derartiger Aggregate bzw. Verfahrenskonzepte je nach ARA-Standort und -Rahmenbedingungen sehr differenziert darstellen können. Die Kosten für die Klärschlamm-trocknung und -nutzung werden bezogen auf den Einwohnerwert (EW) angegeben, um eine anlagenspezifische Berechnung der Investitionskosten zu ermöglichen. Zu demselben Zwecke werden die Kosten für Gasspeicher bezogen auf Normkubikmeter berücksichtigt. Die Nutzungsdauer wird je Aggregat mit 30 Jahren und der Zinssatz mit 3 % angenommen. [11]

**Tabelle 5-1: Investitionskosten bei Anlagenerweiterung bzw. -anpassung zur Bereitstellung von Flexibilität**

Aggregat/Verfahrenskonzept	Einheit	Wert	Quelle
IKT-Einheit	€	6.500,00	Annahme nach [11]
Trockner	€EW <sup>-1</sup>	36,00	Annahme nach Herstelleranfrage
Verbrennung	€EW <sup>-1</sup>	50,00	Annahme nach [43]
Organic Rankine Cycle (ORC)	€EW <sup>-1</sup>	6,00	Annahme nach [106]
Verbrennung inkl. ORC	€EW <sup>-1</sup>	56,00	Annahme nach [43, 106]
Gasspeicher	€Nm <sup>-3</sup>	100,00	Annahme nach Durchschnittspreisen diverser Gasspeicher gemäß [107]
Vergasung inkl. BHKW	€EW <sup>-1</sup>	60,00	Annahme nach Herstelleranfrage
Vergasung inkl. Heizkessel	€EW <sup>-1</sup>	50,00	Annahme nach Herstelleranfrage
Vergasung inkl. Heizkessel & ORC	€EW <sup>-1</sup>	56,00	Annahme nach Herstelleranfrage und [106]

### 5.2.2.3 Fixe Betriebskosten ( $Opex_{fix}$ )

Die jährlichen fixen Betriebskosten  $Opex_{fix}$  beinhalten unter anderem Instandhaltungs-, Reparatur-, sowie Versicherungskosten und werden mit 1,5 % der Investitionskosten  $I$  abgeschätzt. [11]

### 5.2.3 Flexibilitätskennzahlen

Da eine Steuerung der flexiblen Aufbringung (z.B. des Faulgas- oder Produktgas-BHKWs) nur bei freien Speicherkapazitäten möglich ist, werden die erforderlichen Speicherkapazitäten für Gasspeicher in  $\text{Nm}^3$ , sowie für den Schlammstapel in Tonnen TS ermittelt. Diese Kennzahlen können als Richtwert bei der Auslegung von Speichergrößen herangezogen werden.

Zur Beurteilung des Flexibilitätseinsatzes in den netz- und systemdienlichen Szenarien, wird im Steady-State-Teilmodell 2 je flexiblem Aggregat aufgezeichnet, in wie vielen 15 min-Zeitschritten ein Eingriff zur Flexibilitätsbereitstellung stattfindet. Zudem wird auf Basis von Jahresdauerlinien der Bedarfsprofile an netz- und systemdienlicher Flexibilität illustriert, in wie vielen Stunden die benötigte Flexibilität vollständig durch die ARA bereitgestellt werden kann. Die realisierbare positive und negative Energiemenge  $E_A$  je flexiblem Aggregat wird anhand der Formel (5-9) ermittelt. Hier wird das Bedarfsprofil (= Leistungsprofil) der netz- oder systemdienlichen Flexibilität nach dem Ausgleich  $P_{nA}(t)$  von dem Bedarfsprofil vor dem Ausgleich  $P_{vA}(t)$  abgezogen. Zur Berechnung der positiven Energiemenge dienen die Leistungen  $\geq 0$  und zur Erhebung der negativen Energiemenge die Leistungen  $\leq 0$ .

$$E_A = E_{R,vA} - E_{R,nA} = \int_{t_{Start}}^{t_{Ende}} P_{vA}(t) dt - \int_{t_{Start}}^{t_{Ende}} P_{nA}(t) dt \quad (5-9)$$

$$Er_A = \int_{t_{Start}}^{t_{Ende}} [P_F(t) * Pr_L + P_A(t) * Pr_A(t)] dt \quad (5-10)$$

Anhand der systemdienlichen Szenarien soll dargestellt werden, welche Erlöse durch die Bereitstellung von Sekundär- (SRL) und Tertiärregelleistung (TRL) auftreten können und ob diese zur Deckung der IKT-, Speicher- und Energiekosten einer Flexibilisierung ausreichen. Die Erlöse  $Er_A$  sind eine monetäre Flexibilitätskennzahl und werden gemäß der Formel (5-10) berechnet.  $P_F$  steht für das theoretische Flexibilitätspotential je Zeitschritt und  $Pr_L$  für den Leistungspreis. Zudem bezeichnet  $P_A$  das realisierbare Flexibilitätspotential je Zeitschritt und  $Pr_A$  den Arbeitspreis. Als Grundlage für die Leistungs- und Arbeitspreise der Jahre 2014 bis 2018 dienen statistische Daten der APG. Dabei wird für den Leistungspreis ein Durchschnitt der Preise für SRL und TRL der Jahre 2014 bis 2018 herangezogen. Es ergibt sich ein Leistungspreis von  $3,59 \text{ €MWh}_{el}^{-1}$  für positive und von  $5,65 \text{ €MWh}_{el}^{-1}$  für negative Regelleistung. [108] Als Arbeitspreis wird der mengengewichtete Preis der jeweiligen Viertelstunde für die von der APG abgerufene Regelleistung herangezogen. Die Preise sind für negative und positive SRL, sowie TRL für die Jahre 2014 bis 2018 auf der Homepage der APG verfügbar. [109]

### 5.3 Schritt 1: Stationäres Massen- und Energiebilanzmodell des Systems „kommunale ARA“

Schritt 1 beinhaltet die Erstellung des stationären Massen- und Energiebilanzmodells des Systems „kommunale ARA“ mittels EXCEL [96], welches die Basis von OPTIEVLEX bildet. Das stationäre Massen- und Energiebilanzmodell ermöglicht die Ermittlung von jährlichen mittleren Massen- und Energieströmen, aus welchen die stationären energetischen Charakteristika abgeleitet werden können. Zudem können in Verbindung mit dem Steady-State-Teilmodell 1 die mittleren Massen- und Energieströme je Zeitschritt für die Flexibilitätsanalysen berechnet werden. Diese stellen in weiterer Folge die Grundlage zur Ermittlung der zeitlich aufgelösten Jahreslast- und -aufbringungsprofile, sowie der zeitlich aufgelösten theoretischen und realisierbaren Flexibilitätspotentiale dar.

Die nachfolgenden Unterkapitel dienen der Erläuterung der Systemgrenzen des Systems „kommunale ARA“, sowie der Charakterisierung des Massenstromes „Zulauf“. Zudem werden die einzelnen Module des Systems hinsichtlich der Nutzerspezifikationen, des theoretischen Hintergrundes und der berechenbaren Ergebnisse genauer beleuchtet. Um die detaillierten Informationen der einzelnen Module besser einordnen zu können, wird vorab eine allgemeine Einleitung zur Modulbeschreibung gegeben.

#### 5.3.1 Systemgrenze

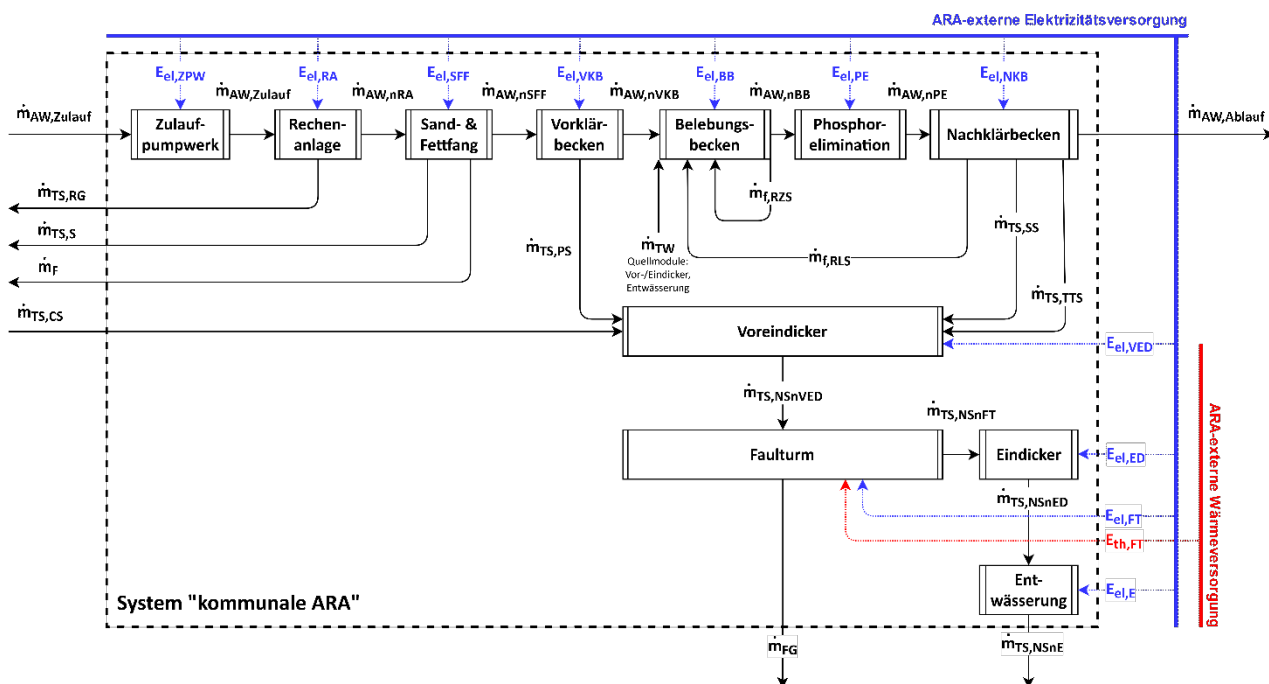


Abbildung 5-5: Systemgrenze und Module des Systems „kommunale ARA“ als Basis für das stationäre Massen- und Energiebilanzmodell in OPTIEVLEX

Bei der Erstellung von Massen- und Energiebilanzen von kommunalen ARAs gilt es alle wichtigen Reinigungs- und Schlammbehandlungsmodule, wie z.B. das Belebungsbecken oder die Entwässerung, sowie wichtige Einflussfaktoren, wie z.B. die Abwasserzusammensetzung, zu berücksichtigen. Vor allem eine integrierte Gesamtbetrachtung aller Module inklusive deren energietechnischen Charakteristika, sowie der Wechselwirkungen zwischen den Modulen ist essenziell. Daher bildet das stationäre Massen- und Energiebilanzmodell des Systems „kommunale ARA“ alle Module inklusive deren Zusammenhänge einer Standard-Technik-ARA zur Reinigung kommunaler Abwässer mit dem Belebtschlammverfahren und simultaner aerober oder mesophiler anaerober Schlammstabilisierung ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass über 95 % des kommunalen Abwassers im deutschsprachigen Raum (Deutschland, Österreich und Schweiz) mittels Anlagen dieser Art gereinigt wird [11, 19–21]. Abbildung 5-5 veranschaulicht alle im Modell enthaltenen Module, für das Beispiel einer Belebungsanlage mit anaerober Schlammstabilisierung. Hier wird ersichtlich, dass alle Standard-Technik-Module der mechanischen, biologischen und ergänzenden Reinigung, sowie der Schlammbehandlung bis hin zur Entwässerung (siehe Kapitel 2) abgebildet werden. Für eine Belebungsanlage mit aerober Stabilisierung entfallen die Module „Vorklärbecken“, „Voreindicker“ und „Faulturm“, sowie die dazugehörigen Massen- (durchgehender Pfeil) und Energieströme (strichlierter Pfeil). Die Module fassen jeweils die elektrischen und thermischen Aggregate, wie z.B. Gebläse oder Heizschlammumpfen, des spezifischen Reinigungs-, Behandlungs- oder Verwertungsschrittes zusammen. Die Module stehen über die Massenströme an Abwasser  $\dot{m}_{AW}$  und Schlammrockensubstanz (TS)  $\dot{m}_{TS,S}$  in Verbindung. Die diverseren Schlammarten, Primärschlamm (PS), Sekundärschlamm (SS), Tertiärschlamm (TTS), Rezirkulationsschlamm (RZS), Rücklaufschlamm (RLS) und Nutzschlamm (NS) spiegeln sich in den tiefgestellten Kürzeln bei den Massenströmen wider. Ein Massenstrom an Co-Substraten  $\dot{m}_{TS,CS}$  kann dem System zugeführt werden. Massenströme die die Systemgrenzen verlassen werden einer externen Behandlung, Verwertung oder Deponierung zugeführt. Dazu zählen die Massenströme an Rechengut  $\dot{m}_{TS,RG}$ , Sand  $\dot{m}_{TS,S}$ , Fett  $\dot{m}_F$  und Nutzschlamm  $\dot{m}_{TS,NS}$ . Der Bedarf an elektrischer Energie für die einzelnen Module, ist in Form von blauen punktierten Pfeilen dargestellt. Ein thermischer Energiebedarf wird durch rote punktierte Pfeile gekennzeichnet. Der Energiebedarf wird über eine ARA-externe Versorgung gedeckt.

Es gilt zu beachten, dass spezielle Behandlungsprozesse wie eine Ultraschalldesintegration oder thermische Hydrolyse nicht direkt über Module berücksichtigt werden. Diese sind indirekt über die Spezifizierung von Massenströmen, sowie über Module, die die Eingabe zusätzlicher thermischer oder elektrischer Verbräuche ermöglichen, integrierbar. Beispielsweise ist die Zusammensetzung des Faulgases oder Schlammes anpassbar, um die Auswirkungen zusätzlicher Behandlungsschritte zu berücksichtigen.

## 5.3.2 Zulauf

### 5.3.2.1 Nutzerspezifikationen

Der Massenstrom  $\dot{m}_{AW,Zulauf}$  stellt den Abwasserzufluss dar und ist in OPTIEVLEX über den mittleren stündlichen Abwasservolumenstrom in  $\text{m}^3\text{h}^{-1}$ , sowie die mittleren stündlichen Konzentrationen von CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf), TN (Total Nitrogen = Gesamtstickstoff in der homogenisierten Probe als Stickstoff) und TP (Total Phosphor = Gesamtphosphor in der homogenisierten Probe als Phosphor) in  $\text{mg l}^{-1}$  zu spezifizieren. Zudem kann der inerte Anteil an löslichem und partikulärem CSB, sowie der anorganische Anteil an abfiltrierbaren Stoffen (XTS) nach DWA [74] optional definiert werden. Eine Spezifikation des Zulaufvolumenstromes, sowie der Zulaufkonzentrationen und -fraktionen beeinflusst in weiterer Folge den Massenstrom an PS  $\dot{m}_{TS,PS}$ , SS  $\dot{m}_{TS,SS}$  und TTS  $\dot{m}_{TS,TTS}$  und ermöglicht eine Annäherung an anlagenspezifische reale Gegebenheiten. Trübwasser aus der Schlammbehandlung, welches in OPTIEVLEX in den Modulen „Voreindicker“, „Eindicker“ und „Entwässerung“ anfällt, wird dem Belebungsbeckenzulauf zugerechnet, bevor die Massen- und Energiebilanz berechnet wird. Die Annahmen zur Ermittlung des Trübwassermassenstroms  $\dot{m}_{TW}$  werden in den einzelnen Modulen erläutert (siehe Kapitel 5.3.11 und 5.3.13). Neben der Spezifikation der Zulauf- und Trübwasserparameter kann eine Spezifikation der Ablaufgrenzwerte vorgenommen werden. Erfolgt dies nicht, werden die gesetzlichen Ablaufgrenzwerte gemäß der ersten AEV für kommunales Abwasser [95] den Berechnungen hinterlegt.

### 5.3.2.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – theoretischer Hintergrund

Die in OPTIEVLEX hinterlegten Literaturwerte zum kommunalem Abwasseranfall [26, 110], sowie der kommunalen Abwasserzusammensetzung [25] werden zur Berechnung herangezogen, sofern keine Nutzerspezifikationen vorgenommen werden. Die Literaturwerte sind in Tabelle 5-2 dargestellt. Bei Betrachtung der Mittelwerte des Abwasseranfalls ist eine Zunahme bei steigender Einwohnerzahl beobachtbar. Diese ist darauf zurückzuführen, dass der Abwasseranfall von Gewerbebetrieben, Einkaufszentren, öffentlichen Einrichtungen und Wasserwerken dem kommunalen Abwasseranfall zugerechnet wird. Da Einrichtungen mit hohem Wasserbedarf, z.B. Krankenhäuser, Hotels oder Einkaufszentren, eher in größeren Siedlungsräumen zu finden sind erhöhen diese die Abwassermenge je Einwohner und Tag. [26, 110] Die Abwasserzusammensetzung bildet kommunales Abwasser ab. Es wird angenommen, dass ein Einwohner (E) einem Einwohnerwert entspricht und die Abwassermenge daher pro EW der ARA zufließt. Die Dichte des Abwassers wird aufgrund der im gesamten Jahr konstanten Abwassertemperatur von rund  $16^\circ\text{C}$  mit  $1.000 \text{ kg m}^{-3}$  angenommen. [111]

Tabelle 5-2: Literaturwerte zu Abwasseranfall und -zusammensetzung

Abwasseranfall [26, 110]		Abwasserzusammensetzung [25]	
Einwohnerzahl	Abwassermenge [IE <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]	Inhaltsstoff	Fracht [gEW <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]
bis 5.000	150,00	CSB	120,00
5.001 bis 10.000	180,00	BSB <sub>5</sub> <sup>1</sup>	60,00
10.001 bis 100.000	210,00	XTS <sup>2</sup>	70,00
100.001 bis 250.000	240,00	TP	1,80
> 250.000	275,00	TN	11,00

1 Biochemischer Sauerstoffbedarf innerhalb von 5 Tagen

2 Konzentration der mit 0,45 µm Membranfilter abfiltrierbaren Stoffe nach Trocknung bei 105 °C

Die Zulauffraktionierung erfolgt sowohl bei spezifizierter Abwasserzusammensetzung als auch bei Literaturwerten (siehe Tabelle 5-2) gemäß dem Arbeitsblatt DWA-A 131 [74]. Dabei werden für den inerten Anteil an löslichem und partikulärem CSB, sowie den anorganischen Anteil an abfiltrierbaren Stoffen (XTS) die für kommunales Abwasser üblichen Anteile von 0,05, 0,25 und 0,20 angenommen.

### 5.3.2.3 Modulergebnisse

Der Abwassermassenstrom  $\dot{m}_{AW,Zulaufl}$ , sowie dessen Zusammensetzung wird an das erste aktivierte Modul der kommunalen ARA übergeben.

### 5.3.3 Allgemeine Einleitung zur Modulbeschreibung

Die allgemeine Einleitung betrifft alle Module der stationären Massen- und Energiebilanzmodelle der Systeme „kommunale ARA“ und „Energieverbund“. Die Massen- und Energiebilanz der Module wird gemäß der Abbildung 5-6 und der Formeln (5-13) und (5-14) ermittelt.



Abbildung 5-6: Massen- und Energiebilanz je Modul

$$\frac{dm(t)}{dt} = \dot{m}_{ein}(t) - \dot{m}_{aus}(t) \tag{5-11}$$

$$\frac{dE(t)}{dt} = E_{ein}(t) - E_{aus}(t) \tag{5-12}$$

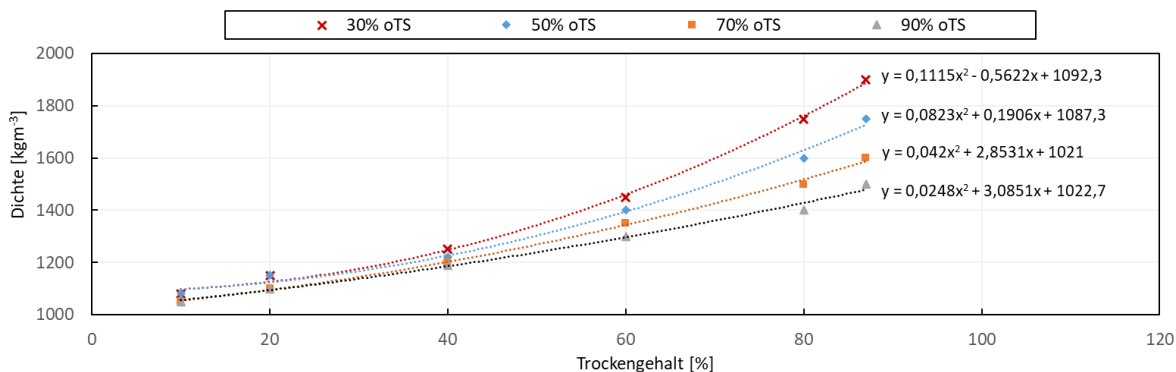
Die Massen- und Energiebilanz wird in den Kapiteln 5.3.4 bis 5.4.4 für jedes Modul dargestellt. Dabei werden der Bilanzraum, die Massenströme  $\dot{m}$  (durchgehender Pfeil) und die Energieströme  $E$  (gestrichelte Pfeile) je Modul dargestellt.

Bei Ermittlung der Massen- und Energiebilanz je Modul können Nutzerspezifikationen hinterlegt werden, welche der Annäherung an reale Gegebenheiten dienen. Allgemein gültige Erläuterungen zu den Nutzerspezifikationen sind dem Kapitel 5.3.3.1 zu entnehmen. Zudem sind den Modulen Berechnungsansätze und Literaturwerte hinterlegt, welche zur Berechnung herangezogen werden, wenn keine Nutzerspezifikationen vorliegen. Für alle Module gültige Annahmen, Berechnungsansätze oder Literaturwerte sind in Kapitel 5.3.3.2 zu finden. Allgemeine Informationen zu Modulergebnissen sind in Kapitel 5.3.3.3 nachlesbar. Detaillierte Erläuterungen zu den Nutzerspezifikationen und Ergebnissen je Modul erfolgen im Sinne einer Verwendung der Dissertationsschrift als Nutzerhandbuch in den Kapiteln 5.3.4 bis 5.4.4.

### 5.3.3.1 Nutzerspezifikationen

Die Nutzerspezifikationen können je nach Detailgrad zur vollständigen Definition der Ergebnisse führen oder, gemeinsam mit Literaturwerten, als Inputparameter für die Berechnung der Modulergebnisse herangezogen werden. Da die Literaturwerte hinsichtlich des spezifischen Energiebedarfs oder der Wirkungsgrade der in den Modulen zusammengefassten Aggregate meist eine breite Streuung aufweisen, wird dies auch in den Ergebnissen berücksichtigt. Liegt ein breiter Wertebereich vor, werden die Ergebnisse für den minimalen, maximalen und durchschnittlichen Wert des Inputparameters berechnet.

Die Einheiten der spezifizierbaren Inputparameter sind an die Auslegungs- und Idealwertberechnungen der DWA angelehnt und beziehen sich meist auf Volumenströme [17, 74]. Um vor allem die unterschiedlichen Dichten der über den Reinigungsprozess anfallenden Schlämme berücksichtigen zu können, werden die Volumenströme in den Modulen zu Massenströmen umgerechnet. Die Schlamm-dichte zeigt, wie in Abbildung 5-7 ersichtlich, vor allem eine Abhängigkeit vom Trockengehalt und der organischen Trockensubstanz (oTS) [112]. Je nach oTS wird das zugehörige Polynom gemäß Abbildung 5-7 für die Berechnung der Schlamm-dichte herangezogen.



**Abbildung 5-7: Schlamm-dichten in Abhängigkeit des Trockengehaltes und des Glühverlustes – eigene Darstellung nach [112]**



Das Normvolumen bezieht sich hier und in den nachfolgenden Modulen gemäß DIN 1343 [113] auf eine Normtemperatur von 273,15 K und einen Normdruck von 101.325 Pa. Die Dichte und spezifische Wärmekapazität der Gase (Luft, Faulgas, Rauchgas etc) werden je nach Gaszusammensetzung, Temperatur und Druck berechnet. Die Dichte basiert auf dem Idealgasansatz und die isobare spezifische Wärmekapazität auf der Aly-Lee-Gleichung. [114]

### 5.3.3.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – theoretischer Hintergrund

Die Nutzerspezifikationen, Schlamm-dichten und Stoffwerte fließen in die Berechnungsansätze der Module ein. Die Berechnungsansätze kommen zum Einsatz, wenn die Massen- und Energieströme nicht vollständig über die Nutzerspezifikationen definiert werden. Die Ansätze zur Ermittlung der stationären Massen- und Energiebilanz des Systems „kommunale ARA“, sowie „Energieverbund“ orientieren sich zu einem großen Teil an den Bemessungsansätzen der DWA. Hier werden die Formelsätze zur Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen gemäß Arbeitsblatt DWA-A 131 [74], zur Berechnung der energietechnischen Idealwerte nach Arbeitsblatt DWA-A 216 [17], sowie weitere standardisierte Formelsätze und empirische Daten nach DWA-Publikationen herangezogen. Die DWA-Publikationen werden verwendet, da diese zur Auslegung von kommunalen ARAs im deutschsprachigem Raum Anwendung finden und eine ausreichende empirische Datenbasis bieten. [17, 30, 31, 52, 74, 99] Aufgrund des umfangreichen Formelwerks wird bei Erläuterung der Module ein Verweis auf die DWA-Publikationen vorgenommen. Finden bei Modulen angepasste oder abweichende Ansätze Anwendung, um reale Gegebenheiten besser abbilden zu können, werden diese erläutert.

### 5.3.3.3 Modulerggebnisse

Mittels der Massen- und Energiebilanzmodelle erfolgt die Ermittlung des ausgehenden Massenstromes  $\dot{m}_{aus}$ , sowie der ein-  $E_{ein}$  und ausgehenden  $E_{aus}$  Energieströme je Modul. Der eingehende Massenstrom  $\dot{m}_{ein}$  wird durch den Zulauf oder das vorgeschaltete Modul bestimmt.

## 5.3.4 Modul „Zulaufpumpwerk“

Das Modul „Zulaufpumpwerk“ bildet die Pumpen zur Förderung des Abwassers in die ARA ab. Abbildung 5-8 zeigt die Energie- und Massenbilanz des Moduls inklusive exemplarischer Nutzerspezifikationen.

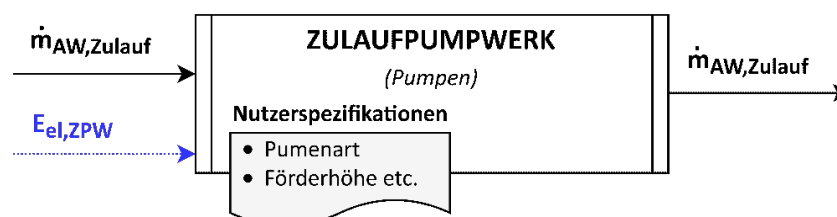


Abbildung 5-8: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Zulaufpumpwerk“

### 5.3.4.1 Nutzerspezifikationen

Die nutzerspezifischen Inputparameter sind für bis zu fünf parallel geschalteten Pumpen definierbar und sind im Anhang in Tabelle 10-5 (siehe S.218) ersichtlich.

### 5.3.4.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – Theoretischer Hintergrund

Bei fehlender Spezifikation der Leistungsparameter wird die mittlere elektrische Antriebsleistung der Pumpe  $P_{el,Antrieb}$  gemäß Formel (5-13) ermittelt und ergibt bei Multiplikation mit den Volllaststunden den mittleren Elektrizitätsbedarf. [17]

$$P_{el,Antrieb} = \frac{P_{el,Pumpe}}{\eta_{ges}} = \frac{P_{el,Pumpe}}{\eta_{Pumpe} + \eta_{Antrieb}} \quad (5-13)$$

Dabei werden die Gesamtwirkungsgrade  $\eta_{ges}$  dem Arbeitsblatt DWA-A 216 [17] entnommen (siehe Tabelle 10-6, Anhang S.218). Da die Berechnung gemäß dem Arbeitsblatt keinen zugehörigen Ansatz zur Ermittlung der Reibungsverluste bietet, wird zur Ermittlung der jeweiligen Pumpenleistung  $P_{el,Pumpe}$  die erweiterte Bernoullische Gleichung mit Energiezufuhr bei reibungsbehafteter Strömung eines realen Fluids inklusive der Reibungsverlustberechnung nach Bischof et al [26] und Metcalf & Eddy [24] herangezogen. [115] Dieser Ansatz ermöglicht die Berücksichtigung der, der von Wasser abweichenden, Rheologie von Abwasser und Schlamm, sowie deren Gemischen über den Reibungsbeiwert  $\lambda$ . Vor allem bei Schlamm, sowie Abwasser-Schlamm-Gemischen handelt es sich um nicht-newtonsche Fluide, die mit dem Verhalten eines Bingham-Fluids beschrieben werden können. Fluide dieser Art fließen erst bei Überwinden einer Anfangsschubspannung und sind daher mit höheren Rohrreibungsverlusten verbunden. Die Pumpenleistung wird gemäß der Formel (5-14) ermittelt.

$$P_{el,Pumpe} = \left[ \frac{\Delta p}{\rho} + g * \Delta h + \frac{\Delta v^2}{2} + \frac{\zeta * v_2^2}{2} + \frac{\lambda * L * v_2^2}{d * 2} \right] * \dot{m}_{AW} \quad (5-14)$$

*Term*            1            2            3            4            5

Hier beschreiben die einzelnen Terme jeweils unter Einbezug des Abwassermassenstromes  $\dot{m}_{AW}$  die diversen Energieanteile bzw. Energieverlustanteile der Strömung. Der erste Term stellt die Druckenergie, welche sich aus dem Verhältnis der Druckdifferenz zwischen Rohrein- und -ausgang  $\Delta p$  und der Dichte  $\rho$  des Fluids ergibt, dar. Der zweite Term bildet die potenzielle Energie ab und ist das Produkt aus der Erdbeschleunigung  $g$  und der Höhendifferenz von Rohrein- zu -ausgang  $\Delta h$ . Der dritte Term charakterisiert den kinetischen Energieanteil unter Einbezug der Differenz der Strömungsgeschwindigkeiten  $\Delta v$  am Rohrein- und -ausgang. Der vierte Term dient der Berücksichtigung von Reibungsverlusten durch

Einbauten und wird über die Strömungsgeschwindigkeit am Rohrausgang  $v_2$  und den Zetawert für Einbauten  $\zeta$  berechnet. Der fünfte Term ermöglicht die Berücksichtigung der Rohrreibungsverluste und bezieht neben der Strömungsgeschwindigkeit auch den Reibungsbeiwert  $\lambda$ , die Rohrlänge  $L$  und den Rohrdurchmesser  $d$  mit ein. Die in OPTIEVLEX berücksichtigten Literaturwerte zu den einzelnen Parametern sind in der Tabelle 10-7 (siehe Anhang S.218) ersichtlich. Die Länge und der Durchmesser des Druckrohres werden über die Förderhöhe und Fließgeschwindigkeit nach den Formeln (5-15) und (5-16) ermittelt.

$$L = \frac{\Delta h}{\sin(30)} \quad (5-15)$$

Die Länge des Druckrohres wird auf Basis einer Schneckenrotorpumpe berechnet, welche in einem Winkel von  $30^\circ$  aufgestellt ist. [26] Es wird angenommen, dass dieser Ansatz auch für andere Pumpenarten eine ausreichend genaue Länge liefert.

$$d = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * \frac{\dot{V}_{AW}}{v}}{\pi}} \quad (5-16)$$

Der Rohrdurchmesser ist von dem Abwasservolumenstrom  $\dot{V}_{AW}$  und der durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeit  $v$  abhängig. Der Volumenstrom wird dabei durch spezifizierte Inputparameter oder hinterlegte Literaturwerte bestimmt. Die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich aus den Geschwindigkeiten am Rohrein- und -ausgang. Die Annahmen dazu sind in Tabelle 10-7 (siehe Anhang S.218) zu finden. [26]

Zur Ermittlung des Reibungsbeiwertes  $\lambda$  wird der Ansatz laut Metcalf & Eddy [24] herangezogen, welcher auf den Formeln (5-17) und (5-18) zur Reynolds- und Hedström-Zahl basiert.

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} \quad (5-17)$$

$$He = \frac{D^2 * s_y * \rho}{\mu^2} \quad (5-18)$$

Zusätzlich zu der Dichte, dem Rohrdurchmesser und der Durchschnittsgeschwindigkeit, fließen die dynamische Viskosität  $\mu$ , sowie die Schubspannung  $s_y$  in die Berechnungen mit ein. Beide Parameter werden mittels charakteristischer Auslegungswerte definiert, welche in Tabelle 10-7 (siehe Anhang S.218) aufgelistet sind. Nach Berechnung der dimensionslosen Kennzahlen wird der Reibungsbeiwert  $\lambda$  der Abbildung 5-9 entnommen. Diese ist im Rahmen von OPTIEVLEX als Wertetabelle hinterlegt.

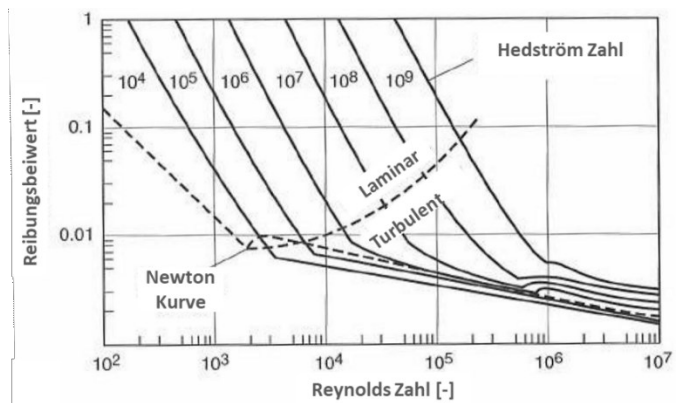


Abbildung 5-9: Reibungsbeiwert  $\lambda$  für Bingham-Fluide nach Reynolds- und Hedström-Zahl [24]

Zur Wahrung der Konsistenz wird zur Ermittlung der Antriebsleistung für alle Pumpen in OPTIEVLEX derselbe Ansatz gewählt. Im Rahmen der durchgeführten Berechnungen liegen die Werte für den Reibungsbeiwert  $\lambda$  bei Abwasser, Schlämmen oder deren Gemischen zwischen 0,02 und 0,05. Dies entspricht auch den in der Literatur angegebenen Reibungsbeiwerten im Bereich der Abwasserreinigung. [24, 26]

### 5.3.4.3 Modulergbnisse

Das Modul liefert bei stationären Analysen den jährlichen elektrischen Elektrizitätsbedarf des gesamten Zulaufpumpwerks  $E_{el,ZWP}$ , welcher auf Basis der jährlichen mittleren Leistungen der Pumpen  $P_{el,Pumpe}$  und der jeweiligen Volllaststunden ermittelt wird. Zudem wird der jährliche Abwassermassenstrom  $\dot{m}_{AW,Zulauf}$  an das nachfolgende Modul übergeben. Es wird angenommen, dass es innerhalb dieses Moduls zu keiner Reduktion des Massenstromes kommt. Bei Flexibilitätsanalysen in Verbindung mit den Steady-State-Teilmodellen 1 und 2 gibt das Modul die mittlere elektrische Gesamtleistung je Zeitschritt aus.

### 5.3.5 Modul „Rechanlage“

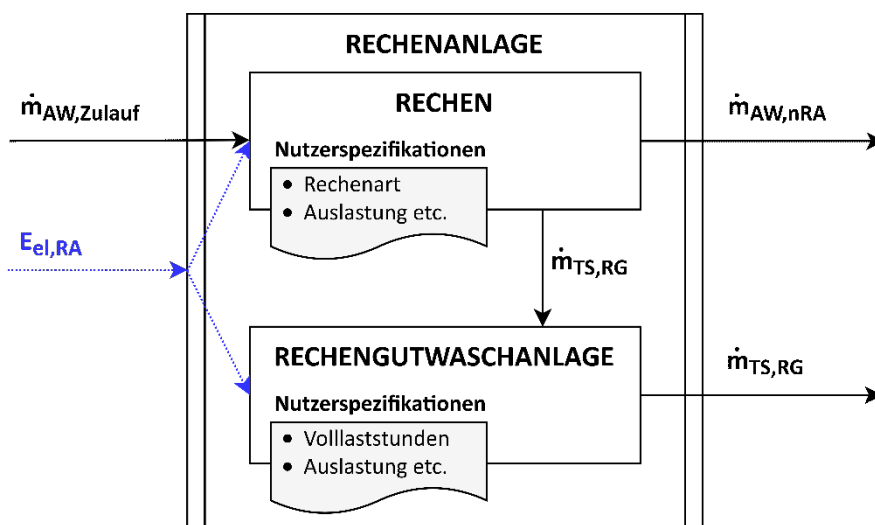


Abbildung 5-10: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Rechanlage“

Das Modul „Rechenanlage“ mit der Massen- und Energiebilanz gemäß Abbildung 5-10 bildet den Rechen und die Rechengutwaschanlage ab.

#### 5.3.5.1 Nutzerspezifikationen

Die nutzerspezifischen Inputparameter sind für bis zu fünf parallel geschalteten Rechen, sowie eine Rechengutwaschanlage definierbar und sind in Tabelle 10-8 (siehe S.219) ersichtlich.

#### 5.3.5.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – Theoretischer Hintergrund

Bei fehlenden Nutzerspezifikationen werden im Rahmen von OPTIEVLEX Berechnungsansätze auf Basis von Literaturwerten herangezogen. Der trockene Rechengutmassenstrom  $\dot{m}_{TS,RG}$  wird in Abhängigkeit der Rechenart über Literaturwerte zum feuchten spezifischen Rechengutvolumenstrom  $\varphi_{RG,AW}$  pro m<sup>3</sup> Abwasser, der Rechengutdichte  $\rho_{RG}$  und dem Trockengehalt  $TG_{RG}$  gemäß der Formel (5-19) nach Metcalf & Eddy [24] berechnet.

$$\dot{m}_{TS,RG} = \varphi_{RG,AW} * \dot{V}_{AW} * \rho_{RG} * TG_{RG} \quad (5-19)$$

Die mittlere Leistung  $P_{el,R}$  des Rechens wird auf Basis eines Literaturwertes zum Elektrizitätsbedarf pro m<sup>3</sup> Abwasser  $E_{el,R,AW}$  nach Bischofsberger [22] ermittelt. Der gleiche Ansatz wird für die Rechengutwaschanlage gewählt. Hier wird eine Herstellerangabe zum Elektrizitätsbedarf pro m<sup>3</sup> Rechengut  $E_{el,RGWA,RG}$  herangezogen. [116] Im Allgemeinen gilt die Formel (5-20), welche den spezifischen elektrischen Energieverbrauch des jeweiligen Aggregates und den Abwasser- bzw. Rechengutdurchfluss  $\dot{V}_{AW}$  bzw.  $\dot{V}_{RG}$  beinhaltet.

$$P_{el,R} = E_{el,R,AW} * \dot{V}_{AW} \quad (5-20)$$

Die Literaturwerte für alle Berechnungen sind im Anhang (S.219) in Tabelle 10-9 und Tabelle 10-10 ersichtlich. Es wird gemäß Metcalf & Eddy [24] angenommen, dass aus der Rechengutwaschanlage kein Rückfluss von Trübwasser zu erwarten ist.

#### 5.3.5.3 Modulergebnisse

Im Rahmen von stationären Analysen liefert das Modul „Rechenanlage“ den jährlichen Trockenmassenstrom an Rechengut  $\dot{m}_{TS,RG}$ . Zudem dient das Modul der Ermittlung des jährlichen Elektrizitätsbedarfs der gesamten Rechenanlage  $E_{el,RA}$  auf Basis der jährlichen mittleren Leistungen der Aggregate und der jeweiligen Volllaststunden. Der jährliche Abwassermassenstrom exklusive dem feuchten Rechengutmassenstrom  $\dot{m}_{AW,nRA}$  wird dem nachfolgenden Modul übergeben. Bei Flexibilitätsanalysen in Verbindung mit den Steady-State-Teilmodellen 1 und 2 gibt das Modul die mittlere elektrische Leistung je Zeitschritt aus.

### 5.3.6 Modul „Sand- und Fettfang“

Das Modul „Sand- und Fettfang“ beinhaltet das Gebläse (nur bei einem belüfteten Sandfang), sowie die Räumern, Pumpen und Sandwaschanlage. Die Massen- und Energiebilanz ist in Abbildung 5-11 ersichtlich.

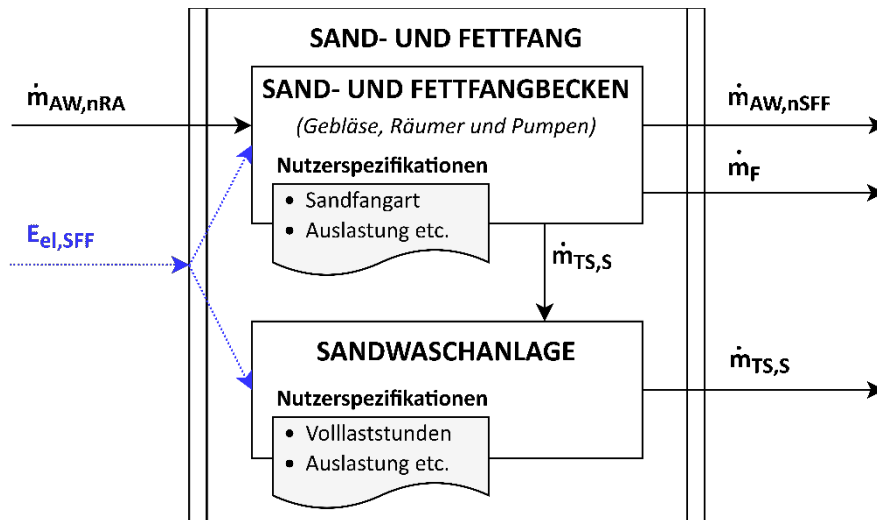


Abbildung 5-11: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Sand- und Fettfang“

#### 5.3.6.1 Nutzerspezifikationen

Die nutzerspezifischen Inputparameter sind für bis zu fünf parallel geschalteten Gebläsen, Räumern und Pumpen, sowie eine Rechengutwaschanlage definierbar und sind im Anhang in Tabelle 10-11 (siehe S.220) ersichtlich.

#### 5.3.6.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – Theoretischer Hintergrund

Fehlende Nutzerspezifikationen führen zur Berechnung der Massen- und Energieströme mittels literaturbasierter Ansätze. Die Ermittlung des Fettmassenstromes  $\dot{m}_F$  erfolgt auf Basis des spezifischen Fettvolumenstromes  $\dot{V}_{F,EW}$  pro Einwohnerwert  $EW$  und Jahr nach Fimml [117] mit der Formel (5-21).

$$\dot{m}_F = \dot{V}_{F,EW} * EW * \rho_F \tag{5-21}$$

Der trockene Sandmassenstrom  $\dot{m}_{TS,S}$  wird nach Metcalf & Eddy [24] über den Literaturwert zum feuchten spezifischen Sandanfall  $\dot{V}_{S,\dot{V}_{AW}}$  pro  $m^3$  Abwasser, der Dichte  $\rho_S$  und dem Trockengehalt  $TG_{RG}$  gemäß der Formel (5-22) berechnet.

$$\dot{m}_{TS,S} = \varphi_{S,AW} * \dot{V}_{AW} * \rho_S * TG_S \tag{5-22}$$

Die mittlere elektrische Antriebsleistung  $P_{el,Antrieb}$  der Gebläse wird analog zur Pumpenberechnung angelehnt an die Idealwertberechnung des Arbeitsblattes DWA-A 216 [17] gemäß der Formeln (5-13) bis (5-16) ermittelt. Dieser Ansatz kann für gasfördernde Gebläse übernommen werden, solange der geförderte Gasstrom als inkompressibel erachtet wird. Dies gilt für Strömungsgeschwindigkeiten  $< 100 \text{ ms}^{-1}$ , was bei Sandfanggebläsen der Fall ist. [115]

Die mittlere elektrische Leistung der Räumler  $P_{el,SFFRäumer}$  wird anhand der spezifischen Leistung je Becken  $P_{el,SFFRäumer,Becken}$  nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216 [17] mit der Formel (5-23) ermittelt. Die Anzahl der Becken wird mit dem Bemessungsansatz der DWA [99, 118] für belüftete Sandfänge mit Fettfang berechnet und ist eine Funktion der Oberflächenbeschickung, sowie der Beckenoberfläche und -dimensionen.

$$P_{el,SFFRäumer} = P_{el,SFFRäumer,Becken} * \text{Anzahl and Becken} \quad (5-23)$$

Die mittlere elektrische Antriebsleistung der Pumpe  $P_{el,Antrieb}$  wird analog zur Vorgehensweise beim Zulaufpumpwerk (siehe Kapitel 5.3.4.2) berechnet. Die Leistung der Sandwaschanlage  $P_{el,SWA}$  wird analog zur Formel (5-20) mittels eines auf einer Herstellerangabe basierendem Elektrizitätsbedarf pro  $\text{m}^3$  Sand  $E_{el,SWA,S}$  [119] bestimmt.

Die wichtigsten Literaturwerte für die Berechnungen sind im Anhang (S.220) in Tabelle 10-12 und Tabelle 10-13 ersichtlich. Es wird gemäß Metcalf & Eddy [24] angenommen, dass aus der Sandwaschanlage keine Rückbelastung durch Trübwasser zu erwarten ist.

### 5.3.6.3 Modulergebnisse

Das Modul liefert bei stationären Analysen den jährlichen Elektrizitätsbedarf  $E_{el,SFF}$  auf Basis der jährlichen mittleren elektrischen Leistungen der im Modul integrierten Aggregate und der zugehörigen Volllaststunden. Zudem wird der jährliche Sand-  $\dot{m}_{TS,S}$  und Fettmassenstrom  $\dot{m}_F$  ermittelt. Der jährliche Abwassermassenstrom wird exklusive dem feuchten Massenstrom von Sand und Fett  $\dot{m}_{AW,nSFF}$  dem nachfolgenden Modul zugeführt. Bei Flexibilitätsanalysen in Verbindung mit den Steady-State-Teilmodellen 1 und 2 gibt das Modul die mittleren elektrischen Leistungen des gesamten Sand- und Fettfangbeckens, sowie der Sandwaschanlage je Zeitschritt aus.

### 5.3.7 Modul „Vorklärbecken“

Das Modul „Vorklärbecken“ findet bei Belebungsanlagen mit mesophiler anaerober Schlammstabilisierung zur Abtrennung des Primärschlammes (PS) Anwendung. Die Massen- und Energiebilanz des Moduls ist in Abbildung 5-12 ersichtlich.

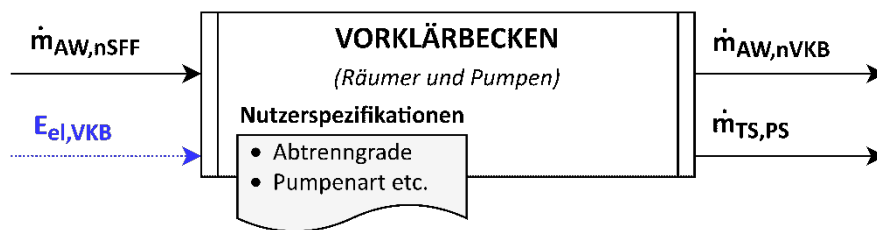


Abbildung 5-12: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Vorklärbecken“

### 5.3.7.1 Nutzerspezifikationen

Die nutzerspezifisch definierbaren Inputparameter gemäß Tabelle 10-14 (siehe S. 221) sind für bis zu fünf parallel geschalteten Räubern und PS-Pumpen definierbar.

### 5.3.7.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – Theoretischer Hintergrund

Der trockene PS-Massenstrom  $\dot{m}_{TS,PS}$ , sowie dessen Zusammensetzung (TS-, CSB-, TN- und TP-Anteil) wird auf Basis der Zulauffraktionierung und Abtrennleistung im Vorklärbecken gemäß dem Arbeitsblatt DWA-A 131 [74] ermittelt (siehe Tabelle 10-16, S.221). Die Formel (5-24) bezieht die Konzentration an im Vorklärbecken abgetrennten abfiltrierbaren Stoffen  $X_{TS,abgetrennt}$  und den Abwasservolumenstrom im Vorklärbecken  $\dot{V}_{AW,nSFF}$  mit ein. [120] Zur Ermittlung des feuchten Massenstromes wird ein Trockengehalt von 5 % angenommen, was dem Durchschnitt gemäß Loll et al. [120] entspricht.

$$\dot{m}_{TS,PS} = X_{TS,abgetrennt} * \dot{V}_{AW,nSFF} \tag{5-24}$$

Die jährliche mittlere Leistung der Räumer  $P_{el,VKBRäumer}$  wird analog zum Sand- und Fettfang nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216 [17] mit der Formel (5-23) ermittelt. Die Anzahl der Becken wird anhand des Abwasservolumenstromes, der gewählten Aufenthaltszeit  $t_{VKB}$  und des typischen Volumens eines rechteckigen Vorklärbeckens  $V_{VKB}$  gemäß Metcalf & Eddy [24] nach der Formel (5-25) ermittelt. Die spezifische Leistung je Becken  $P_{el,VKBRäumer,Becken}$  ist der Tabelle 10-12 (S.220) zu entnehmen.

$$\text{Anzahl der Becken} = \frac{\dot{V}_{AW,nSFF} * t_{VKB}}{V_{VKB}} \tag{5-25}$$

Die jährliche mittlere Antriebsleistung der Pumpe  $P_{el,Antrieb}$  wird analog zur Vorgehensweise beim Zulaufpumpwerk (siehe Kapitel 5.3.4.2) berechnet. Die Annahmen zu den Volllaststunden der Räumer und Pumpen sind in Tabelle 10-15 im Anhang (S.221) dargestellt.



### 5.3.7.3 Modulerggebnisse

Das Modul liefert bei stationären Analysen den trockenen jährlichen PS-Massenstrom  $\dot{m}_{TS,PS}$ . Zudem wird der jährliche Elektrizitätsbedarf des gesamten Vorklärbeckens  $E_{el,VKB}$  auf Basis der jährlichen mittleren Leistung der Aggregate und der jeweiligen Volllaststunden berechnet. Der Abwassermassenstrom  $\dot{m}_{AW,nVKB}$  wird exklusive dem feuchten PS-Massenstrom dem nachfolgenden Modul zugeführt. Bei Flexibilitätsanalysen in Verbindung mit den Steady-State-Teilmodellen 1 und 2 gibt das Modul die mittlere elektrische Gesamtleistung je Zeitschritt aus.

### 5.3.8 Modul „Belebungsbecken“

Das Modul „Belebungsbecken“ stellt das Kernstück der biologischen Reinigungsstufe dar. Die Massen- und Energiebilanz des Moduls ist in Abbildung 5-13 ersichtlich.

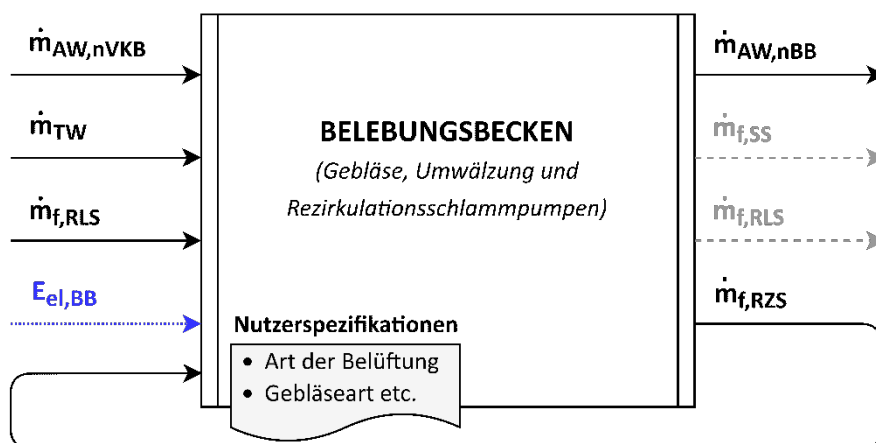


Abbildung 5-13: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Belebungsbecken“

#### 5.3.8.1 Nutzerspezifikationen

Da das Modul „Belebungsbecken“ im Regelfall das energieintensivste Modul einer kommunalen ARA darstellt (siehe Kapitel 2.4) und der Sekundärschlamm (SS)-Massenstrom die dezentrale Energieproduktion stark beeinflusst, weist das Modul zahlreiche Spezifikationsmöglichkeiten zur Annäherung an reale Gegebenheiten auf. Die nutzerspezifisch definierbaren Inputparameter sind in Tabelle 10-17 im Anhang (S.222) ersichtlich.

#### 5.3.8.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – Theoretischer Hintergrund

Der Massenstrom an vorgeklärtem Abwasser  $\dot{m}_{AW,nVKB}$  und dessen Fraktionierung gemäß des Arbeitsblattes DWA-A 131 [74] stellen den Hauptinput des Moduls „Belebungsbecken“ dar und bilden die Basis für die weiteren Berechnungen. Zudem werden, wenn über die Nutzerspezifikationen aktiviert, die feuchten Massenströme an Rezirkulations-  $\dot{m}_{f,RZS}$  und Rücklaufschlamm  $\dot{m}_{f,RLS}$ , sowie der Trübwassermassenstrom  $\dot{m}_{TW}$  dem Belebungsbecken zugeführt. Um die zusätzlichen Massenströme zuführen zu können, müssen diese vorab

ermittelt werden. Dies erfolgt im Zuge einer ersten Berechnungsschleife nach Simulationsstart, welche automatisch in eine zweite Berechnungsschleife übergeht und die im Rahmen der ersten Schleife ermittelten Massenströme dem Belebungsbecken zuführt. Die feuchten und trockenen Massenströme an RZS  $\dot{m}_{RZS}$  und RLS  $\dot{m}_{RLS}$  werden gemäß dem Arbeitsblatt DWA-A 131 auf Basis des Rückführverhältnisses bei interner Rezirkulation RF gemäß Formel (5-26) und dem Rücklaufverhältnis RV gemäß Formel (5-27) bestimmt. Hier fließen die Konzentration des zu denitrifizierenden  $S_{NO_3,D}$  und des ablaufenden  $S_{NO_3,AN}$  Nitratstickstoffes, sowie die Trockensubstanz im Rücklaufschlamm  $TS_{RS}$  und im Belebungsbecken  $TS_{BB}$  mit ein. Die Formelsätze zur Berechnung der Konzentration des zu denitrifizierenden Nitratstickstoffes  $S_{NO_3,D}$  sind im Arbeitsblatt DWA-A 131 zu finden.

$$RF = \frac{S_{NO_3,D}}{S_{NO_3,AN}} \quad (5-26)$$

$$RV = \frac{TS_{RS}}{TS_{BB}} - 1 \quad (5-27)$$

Nach Ermittlung der zulaufenden Massenströme erfolgt die Ermittlung des Schlammalters  $t_{TS}$  nach dem Arbeitsblatt DWA-A 131 [74]. Der dafür herangezogene Berechnungsansatz unterscheidet sich je nach Schlammstabilisierungsverfahren und inkludierten Prozessschritten (Kohlenstoffelimination, Nitrifikation und/oder Denitrifikation). Die erforderlichen Formelsätze sind im Arbeitsblatt DWA-A 131 zu finden und beinhalten die maßgebenden Parameter Belebungsbeckentemperatur  $T_{BB}$ , Wachstumsrate  $\mu_{A,max}$  und Prozessfaktor  $PF$  für die Nitrifikation, sowie das Volumen des Belebungsbeckens  $V_{BB}$  und das davon für die Denitrifikation genutzte Volumen  $V_D$ . Die Formelsätze zur Ermittlung der Beckenvolumen sind ebenfalls im Arbeitsblatt DWA-A 131 verfügbar.

Nach Berechnung des Schlammalters werden die Formelsätze des Arbeitsblattes DWA-A 131 [74] zur Berechnung des trockenen SS-Massenstromes  $\dot{m}_{TS,SS}$ , sowie dessen Zusammensetzung (TS-, CSB-, TN- und TP-Anteil) herangezogen. Der Massenstrom ist gemäß der Formel (5-28) von den zulaufenden Massenströmen  $\dot{m}$ , der CSB-Konzentration des Sekundärschlammes  $X_{CSB,SS}$  und der Konzentration der abfiltrierbaren anorganischen Stoffe im Belebungsbeckenzulauf  $X_{anorgTS,nVKB}$  abhängig. Die Formelsätze zur Ermittlung der einzelnen Parameter sind ebenfalls im Arbeitsblatt DWA-A 131 zu finden. Zur Ermittlung des feuchten Massenstromes wird ein Trockengehalt von rund 1 % gemäß Loll et al. [120] angenommen. Dieser Trockengehalt wird auch für den RLS- und RZS-Massenstrom übernommen.

$$\dot{m}_{TS,SS} = (\dot{m}_{AW,nVKB} + \dot{m}_{TW} + \dot{m}_{f,RLS} + \dot{m}_{f,RZS}) * \left( \frac{X_{CSB,SS}}{0,8 * 1,45} + X_{anorgTS,nVKB} \right) \quad (5-28)$$

Die jährliche mittlere Antriebsleistung  $P_{el,Antrieb}$  der Gebläse bei Druckbelüftung basiert auf der Standard-Sauerstoffzufuhr (SOTR) nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216 [17]. Diese wird mittels des Sauerstoffverbrauchs im Belebungsbecken und der zugehörigen Belüftungsfaktoren (siehe Tabelle 10-18, S.223) berechnet. Dabei variieren die Berechnungsansätze zur Ermittlung des Sauerstoffverbrauchs je nach inkludierten Prozessschritten (Kohlenstoffelimination, Nitrifikation und/oder Denitrifikation). Die Formeln sind im Arbeitsblatt DWA-A 131 [74] zu finden. Die mittlere Antriebsleistung  $P_{el,Antrieb}$  wird analog zu Kapitel 5.3.4.2 gemäß der Formel (5-13) bis (5-16) ermittelt, da auch im Belebungsbeckengebläse Strömungsgeschwindigkeiten  $< 100 \text{ ms}^{-1}$  vorliegen. [115] Zur Ermittlung der höheren Leistung einer Oberflächenbelüftung wird ein Faktor von 1,13 berücksichtigt. [121] Die mittlere Leistung  $P_{el,BB\text{Umwälzung}}$  der Umwälzung wird auf Basis des spezifischen Elektrizitätsverbrauches pro  $\text{m}^3$  Belebungsbeckenvolumen  $E_{el,BB\text{Umwälzung},V_{BB}}$  gemäß Arbeitsblatt DWA-A 216 bestimmt. Die mittlere Antriebsleistung  $P_{el,Antrieb}$  der RZS-Pumpen wird analog zum Modul „Zulaufpumpwerk“ (siehe Kapitel 5.3.4.2) berechnet. Die Literaturwerte zur Leistungsberechnung der Umwälzung und Pumpen sind in Tabelle 10-18 und Tabelle 10-19 (Anhang S.223) dargestellt.

### 5.3.8.3 Modulergebnisse

Das Modul liefert bei stationären Analysen den jährlichen feuchten RZS-Massenstrom  $\dot{m}_{f,RZS}$ . Die jährlichen feuchten Massenströme an SS  $\dot{m}_{f,SS}$  und RLS  $\dot{m}_{f,RLS}$  werden dem Modul „Nachklärbecken“ zugeführt, wo diese mittels Sedimentation abgetrennt werden. Der jährliche Elektrizitätsbedarf der Gebläse, Umwälzung und RZS-Pumpen werden zum jährlichen Bedarf des Moduls „Belebungsbecken“  $E_{el,BB}$  kummuliert. Bei Flexibilitätsanalysen in Verbindung mit den Steady-State-Teilmodellen 1 und 2 gibt das Modul die mittleren elektrischen Leistungen der Gebläse, Umwälzung und RZS-Pumpen, sowie den mittleren SS-Massenstrom je Zeitschritt aus.

## 5.3.9 Modul „Phosphorelimination“

Das Modul „Phosphorelimination“ mit der Massen- und Energiebilanz gemäß Abbildung 5-14 wird in OPTIEVLEX als separates Modul ausgewiesen. Dies dient der getrennten Ermittlung der trockenen SS- und TTS-Massenströme. Es wird das Formelwerk zur Kombination aus biologischer Elimination und Simultanfällung im Belebungsbecken gemäß dem Arbeitsblatt DWA-A 131 [74] zur Berechnung des Moduls herangezogen, womit das Modul diese Arten der Elimination abbilden kann.

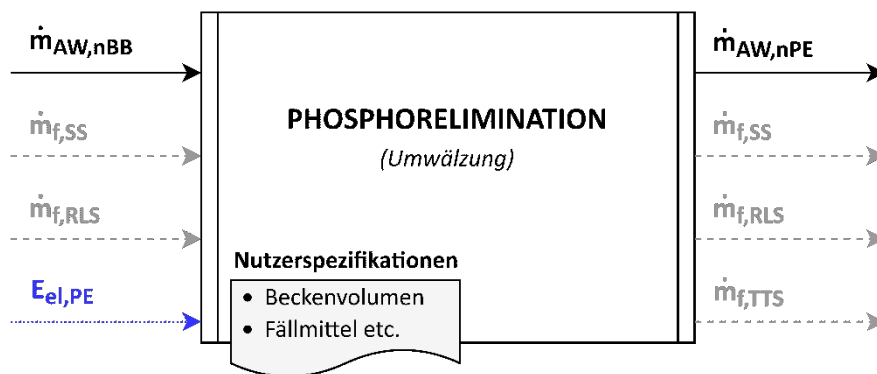


Abbildung 5-14: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Phosphorelimination“

### 5.3.9.1 Nutzerspezifikationen

Die nutzerspezifisch definierbaren Inputparameter sind in Tabelle 10-20 (S.224) gelistet.

### 5.3.9.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – Theoretischer Hintergrund

Die Ermittlung des trockenen TTS-Massenstromes  $\dot{m}_{TS,TTS}$  und dessen Zusammensetzung, sowie des Beckenvolumens erfolgt gemäß dem Arbeitsblatt DWA-A 131 [74]. Der TTS-Massenstrom ist eine Funktion des Abwassermassenstromes  $\dot{m}_{AW,nBB}$  und dessen CSB- und P-Konzentration, sowie des Ablaufgrenzwertes für Gesamt-Phosphor [95]. Zudem wird der Einsatz an Fällmittel berücksichtigt. Das Beckenvolumen stellt eine Funktion des TTS-Massenstromes, des TTS-Schlammalters und des TS-Gehaltes im Becken dar. Bezüglich dem hinterlegten Formelwerk wird auf das Arbeitsblatt DWA-A 131 verwiesen. Zur Ermittlung des feuchten TTS-Massenstromes wird ein Trockengehalt von rund 1 % gemäß Loll et al. [120] angenommen.

Die jährliche mittlere Leistung der Umwälzung  $P_{el,PEUmwälzung}$  wird analog zum Modul „Belebungsbecken“ ermittelt (siehe Kapitel 5.3.8.2). Zur Berechnung des jeweiligen elektrischen Bedarfs werden 8.760 Volllaststunden angenommen [11].

### 5.3.9.3 Modulergbnisse

Das Modul liefert den feuchten jährlichen TTS-Massenstrom  $\dot{m}_{f,TTS}$  an das Modul „Nachklärbecken“, wo der Tertiärschlamm mittels Sedimentation abgetrennt wird. Der jährliche elektrische Bedarf  $E_{el,PE}$  pro Jahr (stationäre Analysen) bzw. die jährliche mittlere Leistung pro Zeitschritt (Flexibilitätsanalysen) des Moduls „Phosphorelimination“ spiegelt den elektrischen Bedarf bzw. die Leistung der Umwälzung wider.

## 5.3.10 Modul „Nachklärbecken“

Das Modul „Nachklärbecken“, mit der Massen- und Energiebilanz gemäß Abbildung 5-15, bildet die Abtrennung des RLS-, SS- und TTS-Massenstromes bei Belebungsanlagen ab.

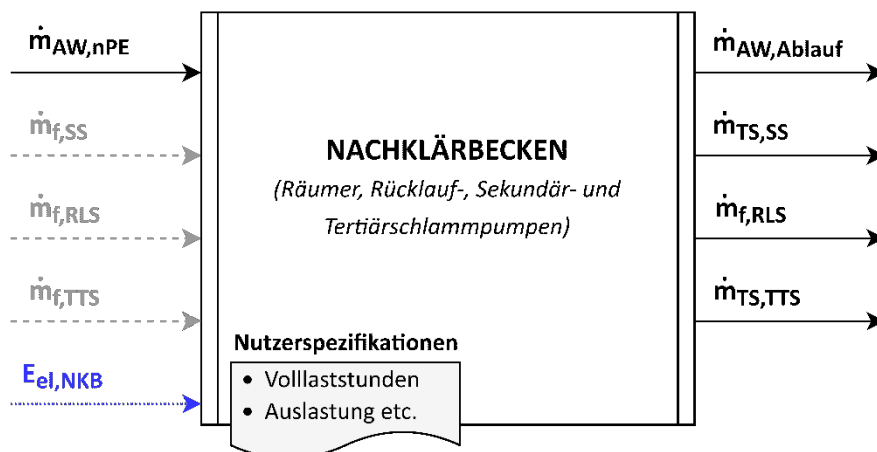


Abbildung 5-15: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Nachklärbecken“

### 5.3.10.1 Nutzerspezifikationen

Die nutzerspezifischen Inputparameter gemäß Tabelle 10-21 (siehe Anhang S.224) sind für bis zu fünf parallel geschalteten Räumen definierbar.

### 5.3.10.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – Theoretischer Hintergrund

Im Nachklärbecken werden die Schlammmassenstrom vom gereinigten Wasser mittels Sedimentation abgetrennt. Der feuchte RLS-Massenstrom  $\dot{m}_{f,RLS}$  wird in das Belebungsbecken zurückgeleitet, während der trockene SS-  $\dot{m}_{TS,SS}$  und TTS-Massenstrom  $\dot{m}_{TS,TTS}$  den Prozessen der Schlammbehandlung zugeführt werden. Die jährlichen mittleren Leistungen  $P_{el,Antrieb}$  der RLS-, SS- und TTS-Pumpen wird analog zum Modul „Zulaufpumpwerk“ (siehe Kapitel 5.3.4.2) berechnet. Die mittlere Leistung der Nachklärbeckenräume  $P_{el,NKB\text{räumer}}$  wird analog zum Modul „Belebungsbecken“ (siehe Kapitel 5.3.8.2) unter Einbezug der Verweildauer im Nachklärbecken  $t_{NB}$  und dem typischen Nachklärbeckenvolumen  $V_{NB}$  gemäß Metcalf & Eddy [24] berechnet. Zur Berechnung des jeweiligen elektrischen Bedarfs werden 8.760 Volllaststunden angenommen [11].

### 5.3.10.3 Modulergebnisse

Bei stationären Analysen werden der jährliche RLS-  $\dot{m}_{f,RLS}$ , SS-  $\dot{m}_{TS,SS}$  und TTS-Massenstrom  $\dot{m}_{TS,TTS}$ , sowie der aus der kommunalen ARA ablaufende Abwassermassenstrom  $\dot{m}_{AW,Ablauf}$  ermittelt. Der jährliche elektrischen Bedarf  $E_{el,NKB}$  ergibt sich aus der jährlichen mittleren Leistung der Räume und Schlammumpen, sowie der zugehörigen Volllaststunden. Bei Flexibilitätsanalysen wird die mittlere Gesamtleistung je Zeitschritt an das Steady-State-Teilmodell 1 geliefert.

### 5.3.11 Module „Voreindicker“ und „Eindicker“

Das Modul bildet Aggregate zur Eindickung von Nutzschlamm ab, und kann in OPTIEVLEX bei einer Belebungsanlage mit aerober Stabilisierung vor der Entwässerung aktiviert werden. Liegt eine Belebungsanlage mit anaerober Stabilisierung vor, kann das Modul sowohl vor als auch nach dem Faulturm integriert werden, was dem Stand der Technik gemäß Kapitel 2.2.3.4 entspricht. [21] Ein Aggregat vor dem Faulturm wird nachfolgend als „Voreindicker“ bezeichnet. Aufgrund analoger Berechnungsansätze werden die Module „Voreindicker“ und „Eindicker“ hier gemeinsam erläutert. Um die Faulraumkapazitäten auszunutzen, können neben dem ARA-internen Nutzschlamm Co-Substrate (CS), wie z.B. Fett- oder Bioabfälle, der Schlammbehandlung zugeführt werden. Eine Co-Substrat-Zugabe wird in OPTIEVLEX im Rahmen des Moduls „Voreindicker“ ermöglicht. Dies stellt sicher, dass eine Voreindickung der Co-Substrate vor der Zuführung in den Faulturm berücksichtigt werden kann. Die Massen- und Energiebilanz der Module „Voreindicker“ und „Eindicker“ sind in Abbildung 5-16 und Abbildung 5-17 ersichtlich.

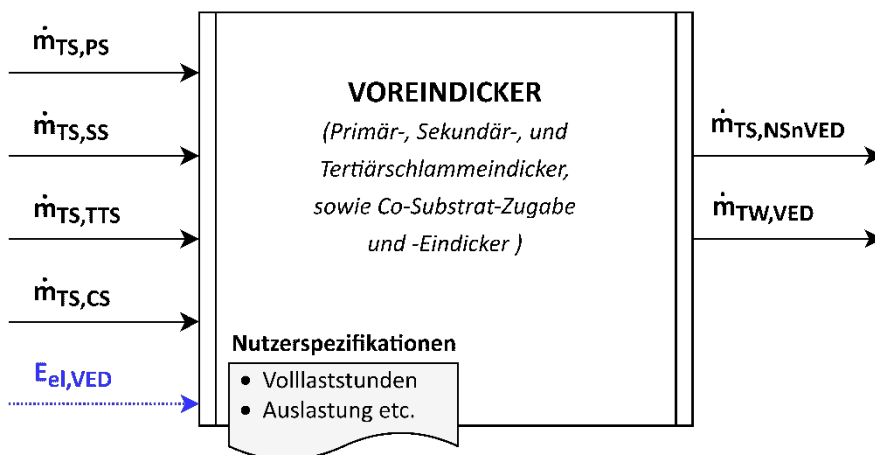


Abbildung 5-16: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Voreindicker“

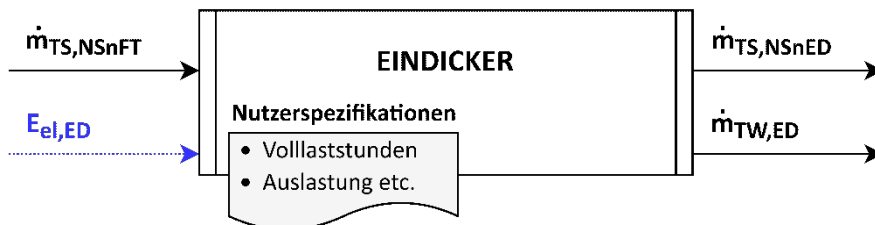


Abbildung 5-17: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Eindicker“

### 5.3.11.1 Nutzerspezifikationen

Die nutzerspezifischen Inputparameter des Moduls „Voreindicker“ sind in Tabelle 10-22 (S.225) und die Inputparameter des Moduls „Eindicker“ in Tabelle 10-23 (S. 226) dargestellt.

### 5.3.11.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – Theoretischer Hintergrund

Das Modul „Voreindicker“ dient der Zusammenführung der je nach ARA-Konfiguration auftretenden Schlammströme ( $\dot{m}_{TS,PS}$ ,  $\dot{m}_{TS,SS}$ ,  $\dot{m}_{TS,TTS}$  und  $\dot{m}_{TS,CS}$ ). Die Zusammensetzung (TS-, CSB-, TN- und TP-Anteil) des Nutzschlammstromes  $\dot{m}_{TS,NSnVED}$  ergibt sich dabei aus den Zusammensetzungen der einzelnen Massenströme. Erfolgt keine Spezifikation der Zusammensetzung des CS-Massenstromes  $\dot{m}_{TS,CS}$ , werden Literaturdaten (siehe Tabelle 10-24, S.226) für weitere Berechnungen herangezogen. Die Veränderung der NS-Zusammensetzung wird je nach zugeführtem Co-Substrat berücksichtigt. Dabei kann es zu Änderungen des TS-, CSB-, TP- und/oder TN-Gehaltes kommen. [43, 93] Erfolgt keine CS-Zugabe wird nach Hansen et al. [122] angenommen, dass keine Änderung des TS-Anteils auftritt, jedoch eine Abscheidung des gelösten CSB-Anteils, ermittelt nach dem Arbeitsblatt DWA-A 131 [74], erfolgt. Die Eindickung bewirkt eine Änderung des Trockengehaltes (TG). Der erreichbare TG je nach Art des Voreindickers wird gemäß dem Merkblatt DWA-M 381 [30] angenommen (siehe Tabelle 10-25, S.227) und dient als Basis für die Berechnung des Trübwassermassenstromes  $\dot{m}_{TW,VED}$ .

Bei inaktivem „Voreindicker“-Modul bzw. wenn keine Co-Substrate zugeführt werden, erfolgt im Modul „Eindicker“ die Zusammenführung der Schlammströme ( $\dot{m}_{TS,PS}$ ,  $\dot{m}_{TS,SS}$ ,  $\dot{m}_{TS,TTS}$  und  $\dot{m}_{TS,CS}$ ) und die Abscheidung des gelösten CSB-Anteils. Zudem wird angenommen, dass im selben Ausmaß Trockensubstanz abgetrennt wird, um die Rückbelastung durch Trübwasser und die Reduktion des trockenen Massenstromes gemäß Hansen et al. [122] abbilden zu können. Liegt eine anaerobe Stabilisierung vor ist beim Modul „Eindicker“ eine höhere Rückbelastung durch die im Zuge der Faulung in Lösung gehenden Stofffraktionen zu berücksichtigen. Dabei ist mit einer CSB-Rückbelastung von 10 %, einer TP-Rückbelastung von 5 % und einer  $NH_4-N$ -Rückbelastung von 20 % der Zulaufkonzentrationen zu rechnen [122]. Im Rahmen von OPTIEVLEX wird angenommen, dass die Abscheidung der in Lösung gehenden Stoffe zu gleichen Teilen über die Trübwassermassenströme  $\dot{m}_{TW,E(D)}$  der Module „Eindicker“ und „Entwässerung“ erfolgt. Die Trübwassermassenströme  $\dot{m}_{TW,E(D)}$  werden auf Basis des erreichbaren TG je nach Art des Eindickers gemäß dem Merkblatt DWA-M 381 [30] berechnet (siehe Tabelle 10-25, S.227).

Der jährliche Elektrizitätsbedarf  $E_{el,(V)ED}$  wird jeweils auf Basis des spezifischen Bedarfes pro  $m^3$  Schlamm nach dem Merkblatt DWA-M 381 ermittelt. Details dazu sind in Tabelle 10-25 (S.227) zu finden. Unter Berücksichtigung von 4.380 Volllaststunden pro Jahr [11] erfolgt die Ermittlung der jährlichen mittleren elektrischen Leistung.

### 5.3.11.3 Modulergebnisse

Die Module „Voreindicker“ und „Eindicker“ liefern den jährlichen Massenstrom an eingedicktem Nutzschlamm  $\dot{m}_{TS,NSn(V)ED}$ , sowie an Trübwasser  $\dot{m}_{TW,(V)ED}$ . Zudem wird bei stationären Analysen der jährliche Elektrizitätsbedarf  $E_{el,(V)ED}$  ermittelt. Bei Flexibilitätsanalysen werden die jährliche mittlere elektrische Leistung pro Zeitschritt, berechnet aus dem jährlichen Elektrizitätsbedarf  $E_{el,(V)ED}$  und den Volllaststunden, an das Steady-State-Teilmodell 1 übergeben.

### 5.3.12 Modul „Faulturm“

Das Modul „Faulturm“ weist die Massen- und Energiebilanz gemäß Abbildung 5-18 auf und ist bei Belebungsanlagen mit anaerober Schlammstabilisierung zu aktivieren.

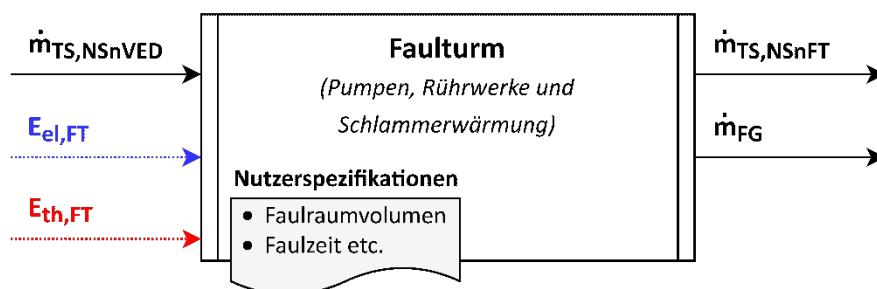


Abbildung 5-18: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Faulturm“

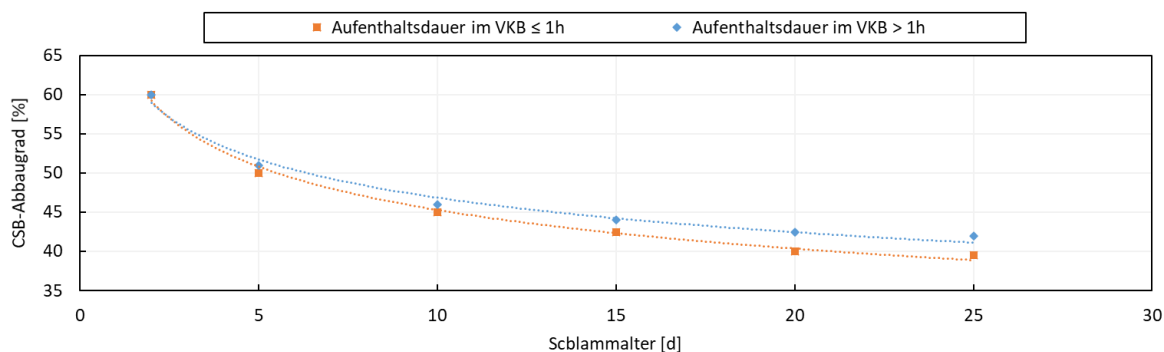
#### 5.3.12.1 Nutzerspezifikationen

Die nutzerspezifisch definierbaren Inputparameter sind in Tabelle 10-26 (S.227) aufgelistet.

#### 5.3.12.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – Theoretischer Hintergrund

Um diverse Schlammzusammensetzungen und deren jeweiliges Faulgaspotential in OPTIEVLEX berücksichtigen zu können, erfolgt die Ermittlung des Faulgasmassenstromes  $\dot{m}_{FG}$  auf Basis des CSB-Abbaugrades bei mesophiler Faulung. Die Abbaugrade in Abhängigkeit der Aufenthaltsdauer im Vorklärbecken und des NS-Schlammalters sind in Abbildung 5-19 ersichtlich. Dabei wird deutlich, dass je kürzer die Verweildauer des PS, SS und TTS (ergeben kumuliert den NS) in den Becken der mechanischen, biologischen und ergänzenden Reinigungsstufe, desto höher ist der CSB-Abbaugrad im Faulturm. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch kurze Verweildauern die CSB-Abbauprozesse in den Reinigungsstufen begrenzt werden. [123]





**Abbildung 5-19: CSB-Abbaugrad im Modul „Faulturm“ in Abhängigkeit der Aufenthaltsdauer im Vorklärbecken und des NS-Schlammalters – eigene Darstellung nach [123]**

Nach der Formel (5-29) wird die CSB-Fracht des NS-Massenstromes  $C_{CSB,NS}$  mit dem jeweiligen Abbaugrad  $Abbaugrad_{CSB}$  und dem stöchiometrischen Faktor 0,35 Normliter (NI) pro Gramm CSB multipliziert, um den  $CH_4$ -Volumenstrom  $\dot{V}_{N,CH_4}$  in  $NIEW^{-1}d^{-1}$  (relative Gasfeuchte 0%) zu berechnen. [123]

$$\dot{V}_{N,CH_4} = C_{CSB,NS} * Abbaugrad_{CSB} * 0,35 \quad (5-29)$$

Der Faulgasmassenstrom  $\dot{m}_{FG}$  und dessen Heizwert werden über die Gaszusammensetzung gemäß Bischofsberger [22] und der Faulgasdichte (siehe Kapitel 5.3.3.1) ermittelt. Bei einem  $CH_4$ -Anteil von 65 Vol.%, einem  $CO_2$ -Anteil von rund 35 Vol.% und geringen Anteilen an  $H_2S$  und  $N_2$  liegt ein unterer Heizwert von ca.  $6,5 \text{ kWhNm}^{-3}$  vor.

Der CSB-Abbau führt zu einer Änderung der CSB-Konzentration im NS-Massenstrom  $\dot{m}_{TS,NS}$ . Zudem sind im Zuge der Faulung in Lösung gehende Stofffraktionen zu berücksichtigen, welche über die Trübwassermassenströme  $\dot{m}_{TW}$  der Module „Eindicker“ und „Entwässerung“ abgeschieden (siehe Kapitel 5.3.11 und 5.3.13) werden. Dabei ist mit einer CSB-Rückbelastung von 10 %, einer TP-Rückbelastung von 5 % und einer  $NH_4-N$ -Rückbelastung von 20 % der ARA-Zulaufkonzentrationen zu rechnen. Die in Lösung gehenden Stofffraktionen führen zusätzlich zu einer Änderung der NS-Zusammensetzung (CSB-, TN- und TP-Konzentration). [122]

Der Elektrizitätsbedarf  $E_{el,FT}$  des Faulturmes inkl. Rührwerk, NS- und Umwälzpumpen wird basierend auf dem spezifischen Bedarf pro  $m^3$  NS  $E_{el,FT,NS}$  nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216 [17] ermittelt. Der Wärmebedarf  $E_{th,FT}$  setzt sich aus dem Wärmebedarf für die NS-Erwärmung, sowie für den Ausgleich der Transmissions-, Speicher- und Verteilungsverluste für das Modul „Faulturm“ zusammen. Der Wärmebedarf der NS-Erwärmung wird mittels des spezifischen Wärmebedarfs je  $m^3$  NS  $E_{th,FT,NS}$  gemäß des Arbeitsblatt DWA-A 216 [17] berechnet. Die spezifischen Verluste  $E_{th,FT,V}$  nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216 beziehen sich auf die Faulturmoberfläche, welche von der Faulzeit, dem Faulgasvolumenstrom und dem Oberflächen-Volumen-Verhältnis abhängt. Tabelle 10-27 (S.228) zeigt die Literaturwerte.

### 5.3.12.3 Modulergebnisse

Bei Durchführung stationärer Analysen erfolgt die Ermittlung der jährlichen Massenströme an ausgefaultem Nutzschlamm  $\dot{m}_{TS,NSnFT}$  und Faulgas  $\dot{m}_{FG}$ . Zudem werden der jährliche mittlere Elektrizitäts-  $E_{el,FT}$  und Wärmebedarf  $E_{th,FT}$  des Moduls ausgewiesen. Bei Flexibilitätsanalysen erfolgt die Übergabe von mittleren Massenströmen und Leistungen je Zeitschritt an das Steady-State-Teilmodell 1.

### 5.3.13 Modul „Entwässerung“

Das Modul „Entwässerung“ weist die Massen- und Energiebilanz gemäß Abbildung 5-20 auf.

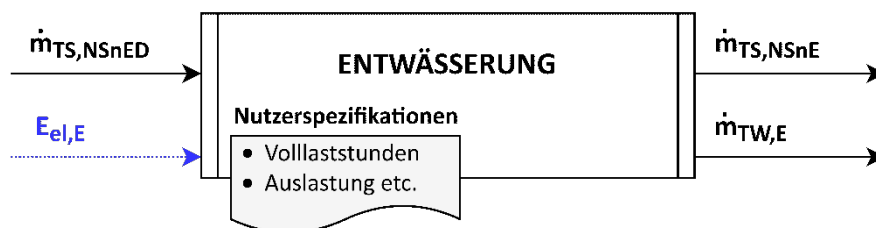


Abbildung 5-20: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Entwässerung“

#### 5.3.13.1 Nutzerspezifikationen

Die nutzerspezifisch definierbaren Inputparameter sind in Tabelle 10-28 (S.228) ersichtlich.

#### 5.3.13.2 Berechnungsansatz in OPTIVLEX – Theoretischer Hintergrund

Zur Ermittlung der Massenströme an entwässertem Nutzschlamm  $\dot{m}_{TS,NSnE}$  und Trübwasser  $\dot{m}_{TW,E}$ , sowie des Elektrizitätsbedarfes  $E_{el,E}$  werden die Berechnungsansätze des Moduls „Eindicker“ (siehe Kapitel 5.3.11.2) herangezogen. Als Datenbasis dienen hierbei die erreichbaren TG je Aggregattyp sowie der spezifische Elektrizitätsbedarf pro  $m^3$  Nutzschlamm gemäß dem Arbeitsblatt DWA-A 216 [17, 31]. Detaillierte Informationen zu den hinterlegten Literaturdaten sind in Tabelle 10-29 (S.229) ersichtlich. Zur Berechnung der Leistung  $P_{el,E}$  werden 2.920 Volllaststunden gemäß Schäfer et al. [11] angenommen.

#### 5.3.13.3 Modulergebnisse

Das Modul liefert bei stationären Analysen die jährlichen Massenströme an entwässertem Nutzschlamm  $\dot{m}_{TS,NSnE}$ , sowie an Trübwasser  $\dot{m}_{TW,E}$ . Der NS-Massenstrom  $\dot{m}_{TS,NSnE}$  wird einer ARA-externen oder -internen Klärschlammnutzung zugeführt, während der Trübwassermassenstrom  $\dot{m}_{TW,E}$  in das Modul „Belebungsbecken“ geleitet wird. Neben den Massenströmen wird der jährliche Elektrizitätsbedarf  $E_{el,E}$  ausgegeben. Bei Flexibilitätsanalysen erfolgt die Übergabe von mittleren Massenströmen und Leistungen je Zeitschritt an das Steady-State-Teilmodell 1.

## 5.4 Schritt 2: Stationäre Massen- und Energiebilanzierung des erweiterten Systems „Energieverbund“

Das im Modellierungsschritt 2 erweiterte stationäre Massen- und Energiebilanzmodell des Systems „Energieverbund“ bildet die ARA-interne Verwertung der erneuerbaren Energieträger, Faulgas und Nutzschlamm, ab. Ziel ist die Ermittlung der jährlichen mittleren Massen- und Energieströme der erweiterten Module. Diese dienen der Ableitung stationärer energietechnischer Charakteristika. Zudem können in Verbindung mit den Steady-State-Teilmodellen 1 und 2 die mittleren Massen- und Energieströme je Zeitschritt für die Flexibilitätsanalysen berechnet werden. Diese stellen in weiterer Folge die Grundlage zur Ermittlung der zeitlich aufgelösten Jahreslast- und –aufbringungsprofile, sowie der zeitlich aufgelösten theoretischen und realisierbaren Flexibilitätspotentiale dar.

Die nachfolgenden Unterkapitel dienen der Erläuterung der Systemgrenzen des Systems „Energieverbund“, sowie der Nutzerspezifikationen, des theoretischen Hintergrundes und der jeweiligen Modulergebnisse. Dabei ist die allgemeine Einleitung zur Modulbeschreibung (siehe Kapitel 5.3.3) zu berücksichtigen.

### 5.4.1 Systemgrenzen

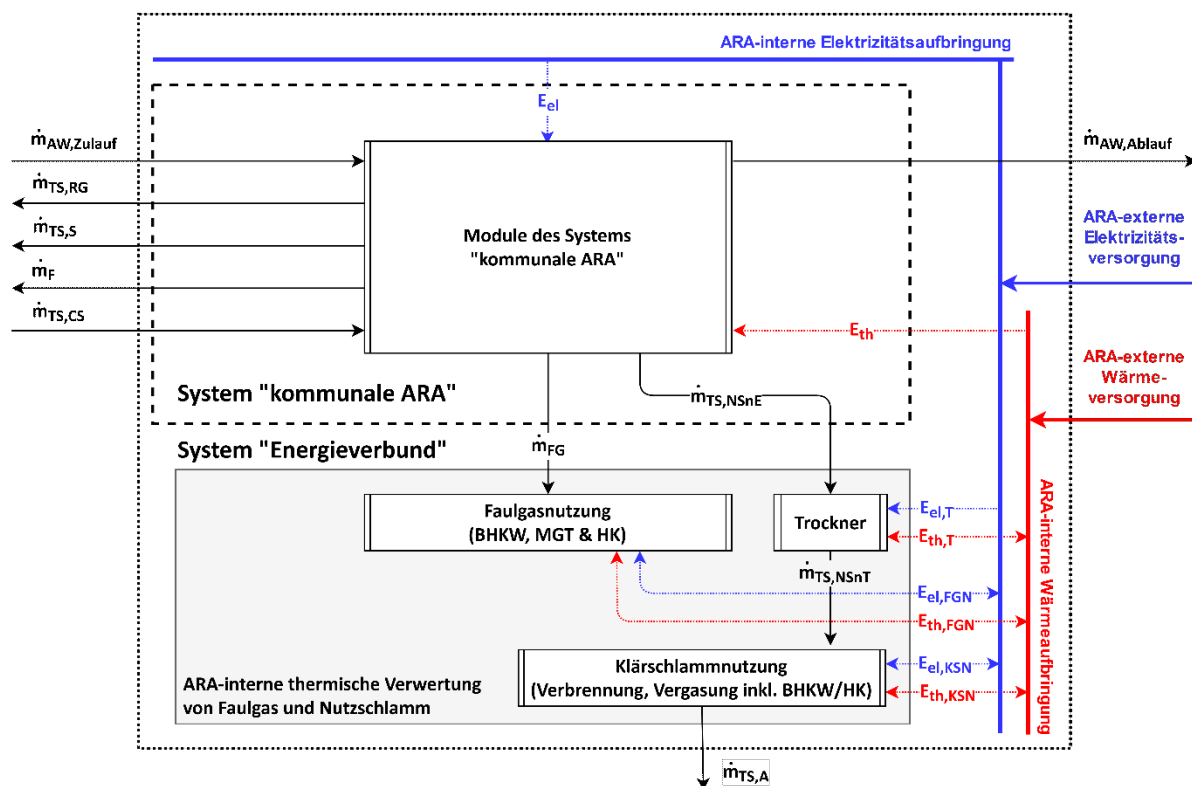


Abbildung 5-21: Systemgrenzen und Module des erweiterten Systems „Energieverbund“ für das stationäre Massen- und Energiebilanzmodell in OPTIEVLEX

Das System „Energieverbund“ gemäß Abbildung 5-21 beinhaltet neben den Modulen des Systems „kommunale ARA“ die Module „Faulgasnutzung“ (FGN), „Trockner“ (T) und „Klärschlammnutzung“ (KSN). Die erweiterten Module dienen der ARA-internen thermischen Verwertung der Massenströme an Faulgas  $\dot{m}_{FG}$  und entwässertem  $\dot{m}_{TS,NSnE}$  bzw. getrocknetem  $\dot{m}_{TS,NSnT}$  Nutzschlamm. Der bei der thermischen Verwertung des Nutzschlammes anfallende Aschemassenstrom  $\dot{m}_{TS,A}$  wird einer externen Behandlung oder Deponierung zugeführt.

Der Bedarf an elektrischer Energie  $E_{el}$  für die einzelnen Module wird in Form von blauen punktierten Pfeilen dargestellt. Ein Bedarf an thermischer Energie  $E_{th}$  wird durch rote punktierte Pfeile gekennzeichnet. Da die Module „Faulgasnutzung“, „Trockner“, sowie „Klärschlammnutzung“ auch elektrische und thermische Energie bereitstellen können, weisen diese Module Doppelpfeile auf. Kann der elektrische und/oder thermische Energiebedarf nicht mittels ARA-interner Aggregate aufgebracht werden, wird Energie aus ARA-externen Versorgungseinheiten zugeführt.

### 5.4.2 Modul „Faulgasnutzung“

Das Modul „Faulgasnutzung“ mit der Massen- und Energiebilanz gemäß Abbildung 5-22 umfasst die Faulgasspeicherung und -reinigung, sowie die thermische Faulgasverwertung.

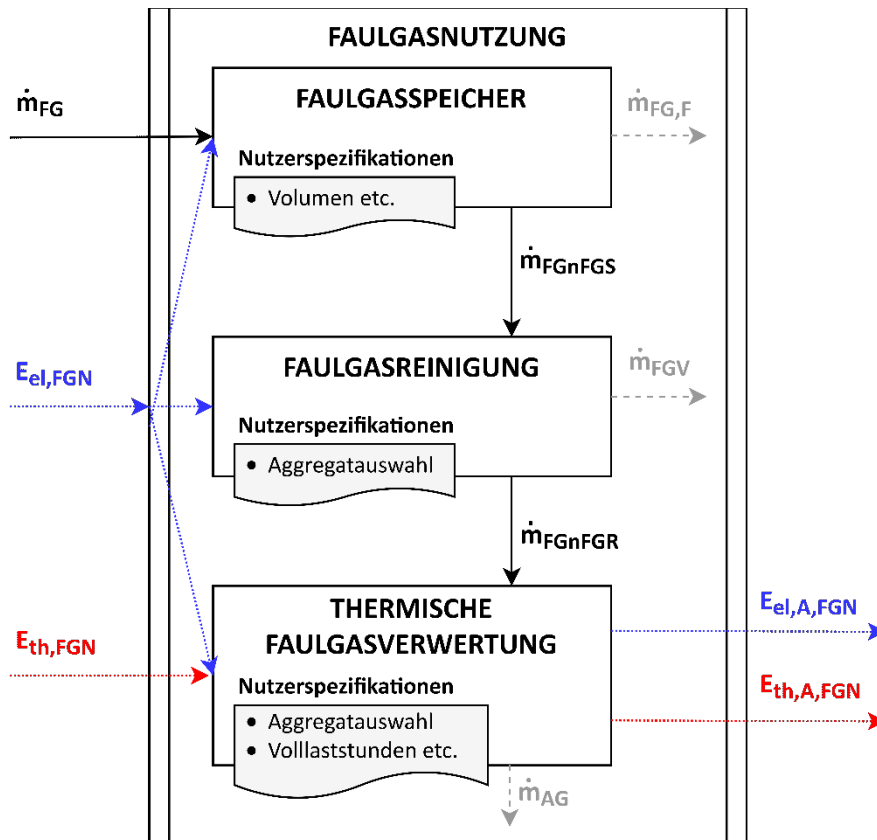


Abbildung 5-22: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Faulgasnutzung“

#### 5.4.2.1 Nutzerspezifikationen

Die nutzerspezifisch definierbaren Inputparameter sind in Tabelle 10-30 (S.229) aufgelistet. Hinsichtlich der thermischen Faulgasverwertung stehen die Verwertungsaggregate Blockheizkraftwerk (BHKW), Mikrogasturbine (MGT) und Heizkessel (HK) zur Auswahl.

#### 5.4.2.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – Theoretischer Hintergrund

In OPTIEVLEX wird angenommen, dass im Faulgasspeicher keine Fackelverluste auftreten, womit der Massenstrom  $\dot{m}_{FG,F}$  bei fehlender Spezifikation entfällt. Es werden jedoch Faulgasverluste aufgrund von Transport- und Wartungsverlusten, sowie Leckagen von insgesamt 5 % über den Massenstrom  $\dot{m}_{FGV}$  berücksichtigt. [11] Der reduzierte Faulgasmassenstrom  $\dot{m}_{FGnFR}$  wird der thermischen Faulgasverwertung zugeführt.

Der elektrische Energiebedarf  $E_{el}$  der Faulgasspeicherung und -reinigung (Messeinrichtungen, Verdichter etc.) wird auf Basis des spezifischen elektrischen Bedarfes von je  $0,1 \text{ kWh}_{el} \text{EW}^{-1} \text{a}^{-1}$  nach dem Merkblatt DWA-M 363 [124] ermittelt. Die Berechnung der Energiebereitstellung mittels thermischer Faulgasverwertung wird für jeden Aggregattyp nachfolgend erläutert.

##### BLOCKHEIZKRAFTWERK (BHKW)

Die Ermittlung der jährlichen elektrischen  $E_{el,A,FGN}$  und thermischen  $E_{th,A,FGN}$  Energieaufbringung mittels BHKWs basiert auf der Brennstoffwärmeleistung  $\dot{Q}_B$  der zugeführten Faulgas-  $\dot{m}_{FGnFR}$  und Erdgasmassenströme  $\dot{m}_{EG,FGN}$ , sowie den elektrischen und thermischen Wirkungsgraden nach elektrischer Nennleistung gemäß des Arbeitsblattes DWA-A 216 [17]. Die Brennstoffwärmeleistung stellt dabei das Produkt aus dem Brennstoffmassenstrom  $\dot{m}_B$  und dem unteren Heizwert  $H_u$  des Brennstoffes dar (siehe Formel (5-30)). Die Wirkungsgrade sind in Tabelle 10-31 (S.230) ersichtlich. Hier gilt zu beachten, dass hinsichtlich der Wärmeaufbringung zwei Temperaturniveaus berücksichtigt werden:

- Hochtemperatur (HT) bezieht sich auf Wasser bei  $140^\circ\text{C}$  als Energieträgermedium
- Mitteltemperatur (MT) bezieht sich auf Wasser bei  $90^\circ\text{C}$  als Energieträgermedium

##### MIKROGASTURBINE (MGT)

Die Ermittlung der jährlichen mittleren elektrischen und thermischen Leistung, sowie der mittels MGT mit Rekuperator [125] bereitgestellten elektrischen  $E_{el,A,FGN}$  und thermischen  $E_{th,A,FGN}$  Energiemenge beruht in OPTIEVLEX auf der Annahme einer isentropen Verdichtung und Expansion, sowie einer isobaren Wärmezufuhr. Der elektrische Wirkungsgrad  $\eta_{el,MGT}$  der Mikrogasturbine ergibt sich dabei gemäß Formel (5-30) aus dem Verhältnis der elektrischen Leistung  $P_{el}$  und der Brennstoffwärmeleistung  $\dot{Q}_B$ . [126]

$$\eta_{el,MGT} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_B} = \frac{P_{el}}{\dot{m}_B * H_u} \quad (5-30)$$

Die mittlere elektrische Leistung  $P_{el}$  wird dabei mit der Formel (5-31) unter Berücksichtigung des mechanischen Turbinenwirkungsgrades  $\eta_m$ , des Generatorwirkungsgrades  $\eta_G$ , sowie der isentropen Turbinen-  $P_{i,T}$  und Verdichterleistung  $P_{i,VD}$  ermittelt. Die Leistungen basieren dabei auf dem Luft-  $\dot{m}_L$  und Rauchgasmassenstrom  $\dot{m}_{RG}$ , sowie den Enthalpieänderungen  $\Delta h$ . Die Massenströme werden über die Bilanzierung der Brennkammer unter Einbezug der Grädigkeit des Rekuperators bestimmt. Die Enthalpieänderungen  $\Delta h$  werden über die Energiebilanz des Kreisprozesses ermittelt. [126, 127]

$$P_{el} = \eta_m * \eta_G * (P_{i,T} - P_{i,VD}) = \eta_m * \eta_G * (\dot{m}_{RG} * (h_3 - h_4) - \dot{m}_L * (h_2 - h_1)) \quad (5-31)$$

Der thermische Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  basiert auf der Formel (5-32). Diese stellt die Brennstoffwärmeleistung  $\dot{Q}_B$  der Nutzwärmeleistung  $\dot{Q}_N$  gegenüber.

$$\eta_{th,MGT} = \frac{\dot{Q}_N}{\dot{Q}_B} = \frac{\dot{Q}_B - \dot{Q}_{AG}}{\dot{Q}_B} \quad (5-32)$$

Die Brennstoffwärmeleistung  $\dot{Q}_B$  wird gemäß der Formel (5-30) berechnet. Bei Annahme einer vollständigen Verbrennung werden die Abgasverluste  $\dot{Q}_{AG}$  gemäß der Formel (5-33) über den Abgasmassenstrom  $\dot{m}_{AG}$  und die mittlere spezifische Wärmekapazität  $\overline{C_{p,AG}}_{T_U}^{T_{AG}}$ , sowie unter Einbezug der Abgastemperatur  $T_{AG}$  und der Umgebungstemperatur berechnet. Der Abgasmassenstrom wird über eine Verbrennungsrechnung ermittelt. [126, 127]

$$\dot{Q}_{AG} = \dot{m}_{AG} * \overline{C_{p,AG}}_{T_U}^{T_{AG,e}} * (T_{AG,e} - T_u) \quad (5-33)$$

Wichtige den Berechnungen hinterlegte Literaturwerte sind in Tabelle 10-32 (S.230) gelistet.

### HEIZKESSEL (HK)

Die thermische Leistung und die darauf basierende bereitgestellte thermische Energiemenge  $E_{th,A,FGN}$  des Heizkessels wird mittels Kesselwirkungsgrad  $\eta_K$  bestimmt. Der Kesselwirkungsgrad wird indirekt über die Berücksichtigung der Abgas-  $\dot{Q}_{AG}$  und Strahlungsverluste  $\dot{Q}_S$  nach der Formel (5-34) berechnet. Die Nutzwärmeleistung  $\dot{Q}_N$  wird dabei der Wärmeleistung des Brennstoffes  $\dot{Q}_B$  und der Luft  $\dot{Q}_L$  gegenübergestellt. [126]

$$\eta_K = \frac{\dot{Q}_N}{\dot{Q}_B + \dot{Q}_L} = \frac{\dot{Q}_B + \dot{Q}_L - \dot{Q}_{AG} - \dot{Q}_S}{\dot{Q}_B + \dot{Q}_L} \quad (5-34)$$

Die Brennstoffwärmeleistung  $\dot{Q}_B$  wird gemäß der Formel (5-30) ermittelt. Die Luftwärmeleistung  $\dot{Q}_L$  kann über die Formel (5-35) berechnet werden, welche den Luftmassenstrom  $\dot{m}_L$ , die mittlere spezifische Wärmekapazität  $\overline{c_{p,L}}^{T_{L,e}}$ , die Luft-  $T_{L,e}$  und die Umgebungstemperatur  $T_u$  beinhaltet. Der Luftmassenstrom wird über eine Verbrennungsrechnung ermittelt.

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_L * \overline{c_{p,L}}^{T_{L,e}} * (T_{L,e} - T_u) \quad (5-35)$$

Bei Annahme einer vollständigen Verbrennung werden die Abgasverluste  $\dot{Q}_{AG}$  gemäß der Formel (5-33) ermittelt. [126] Die Strahlungsverluste  $\dot{Q}_S$  werden basierend auf der Nennleistung  $\dot{Q}_{Nenn}$ , welche in OPTIEVLEX in einem ersten Schritt auf Basis der Brennstoffwärmeleistung  $\dot{Q}_B$  abgeschätzt wird, mit der Formel (5-36) nach DIN V 4701 – 12 [128] berechnet.

$$\dot{Q}_S = \frac{7 * \dot{Q}_{Nenn}^{-0,4}}{100} * \dot{Q}_{Nenn} \quad (5-36)$$

Wichtige den Berechnungen hinterlegte Literaturwerte sind in Tabelle 10-32 (S.230) gelistet.

#### 5.4.2.3 Modulergebnisse

Die Massenströme an abgepackeltem Faulgas  $\dot{m}_{FG,F}$ , Faulgasverlusten  $\dot{m}_{FGV}$  und Abgas  $\dot{m}_{AG}$  stellen interne Masseströme dar, da sie keine Relevanz für weitere Module aufweisen. Bei stationären Analysen wird der jährliche Elektrizitätsbedarf der Faulgasspeicherung, -reinigung und -verwertung ermittelt und als kumulierter Elektrizitätsbedarf  $E_{el,FGN}$  ausgegeben. Zudem wird der jährliche Wärmebedarf der Verwertungsaggregate  $E_{th,FGN}$  berechnet. Des Weiteren wird die mittels Faulgasverwertung jährlich aufgebrauchte elektrische  $E_{el,A,FGN}$  und thermische  $E_{th,A,FGN}$  Energiemenge ermittelt. Bei Flexibilitätsanalysen erfolgt die Übergabe von jährlichen mittleren Leistungen je Zeitschritt, berechnet auf Basis der jährlichen Energiemengen und Volllaststunden, an das Steady-State-Teilmodell 1.

#### 5.4.3 Modul „Trockner“

Bei Berücksichtigung der aktuellen Entwicklungen im Bereich der Klärschlammnutzung (siehe Kapitel 2.3) gewinnen dezentrale (ARA-interne) thermische Verwertungskonzepte an Attraktivität. Diese Konzepte beinhalten häufig dezentrale Trocknungsaggregate, welche mit dem Modul „Trockner“ abgebildet werden können. Die Massen- und Energiebilanz des Moduls ist in Abbildung 5-23 dargestellt.

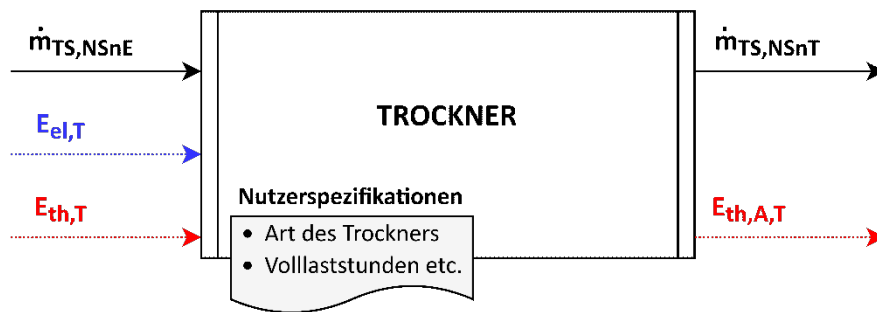


Abbildung 5-23: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Trockner“

#### 5.4.3.1 Nutzerspezifikationen

Tabelle 10-33 (S.231) zeigt die nutzerspezifisch definierbaren Inputparameter.

#### 5.4.3.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – Theoretischer Hintergrund

Es wird angenommen, dass das Modul „Trockner“ zu keiner Reduktion der Trockensubstanz führt. Der getrocknete NS-Massenstrom  $\dot{m}_{TS,NSnT}$  entspricht daher dem entwässertem NS-Massenstrom  $\dot{m}_{TS,NSnE}$ . Es wird angenommen, dass im Rahmen der Trocknung kein Trübwasser anfällt. Eine Änderung der Klärschlammzusammensetzung wird daher nicht vorgenommen. Die Trocknung bewirkt allerdings eine Änderung des Trockengehaltes (TG), was eine Reduktion des feuchten Massenstromes  $\dot{m}_f$  mit sich bringt. Die Ausprägung der Reduktion basiert auf dem erreichbaren TG der jeweiligen Trocknerart nach Obernberger et al. [104].

Die jährliche mittlere elektrische und thermische Leistung des jeweiligen Trockner-Typs  $P_{el/th,T}$  wird nach Formel (5-37) und (5-38) mittels spezifischem Energiebedarf pro Tonne zu verdampfendem Wasser (WV)  $E_{el/th,WV}$  nach Vetter et al. [69] berechnet. Der jährliche Energiebedarf wird auf der Basis von 2.920 Volllaststunden [11] ermittelt.

$$P_{el,T} = E_{el,WV} * \dot{m}_{WV} = E_{el,WV} * (\dot{m}_{f,NSnE} - \dot{m}_{f,NSnT}) \tag{5-37}$$

$$P_{th,T} = E_{th,WV} * \dot{m}_{WV} = E_{th,WV} * (\dot{m}_{f,NSnE} - \dot{m}_{f,NSnT}) \tag{5-38}$$

Der Massenstrom an zu verdampfendem Wasser  $\dot{m}_{WV}$  ergibt sich aus der Differenz des feuchten NS-Massenstromes nach Entwässerung  $\dot{m}_{f,NSnE}$  und des feuchten NS-Massenstromes nach Trocknung  $\dot{m}_{f,NSnT}$ . Zur Berechnung der Wärmerückgewinnung aus dem Trocknungsprozess  $E_{th,A,T}$  werden die Anteile an rückführbarer Abwärme am Wärmebedarf nach Vetter et al. [69] herangezogen. Die Literaturwerte zu den erreichbaren TG, dem spezifischen elektrischen und thermischen Energiebedarf, sowie den Anteilen an rückführbarer Abwärme sind in Tabelle 10-34 (S.231) und Tabelle 10-35 (S.232) ersichtlich.



### 5.4.3.3 Modulerggebnisse

Bei stationären Analysen wird der jährliche NS-Massenstrom nach Trocknung  $\dot{m}_{TS,NSnT}$ , sowie der jährliche elektrische  $E_{el,T}$  und thermische  $E_{th,T}$  Energiebedarf ermittelt. Zudem kann die jährliche rückgewonnene Abwärme  $E_{th,A,T}$  berechnet werden. Bei Flexibilitätsanalysen erfolgt die Übergabe von mittleren Massenströmen und Leistungen je Zeitschritt an das Steady-State-Teilmodell 1

### 5.4.4 Modul „Klärschlammnutzung“

Wie in Kapitel 2.3 erläutert, gewinnen dezentrale thermische Verwertungskonzepte für Klärschlamm an Attraktivität. Da die in den Konzepten integrierten Energieversorgungseinheiten zusätzliche Flexibilitätspotentiale bieten können, sind diese in Analysen hinsichtlich Flexibilitätsdienstleistungen miteinzubeziehen. In der vorliegenden Dissertation liegt der Fokus auf der Verbrennung und Vergasung von Klärschlamm. Pyrolyseaggregate werden in OPTIEVLEX aufgrund fehlender Datengrundlagen aktuell nicht berücksichtigt. Der Aufbau des Moduls „Klärschlammnutzung“ ist in Abbildung 5-24 dargestellt.

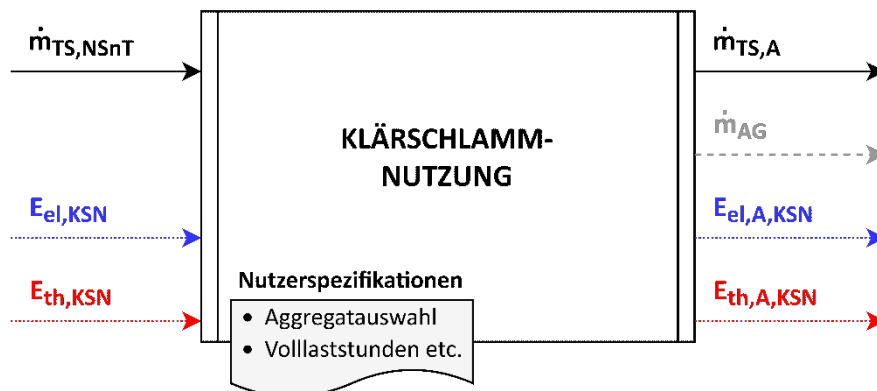


Abbildung 5-24: Massen- und Energiebilanz des Moduls „Klärschlammnutzung“

#### 5.4.4.1 Nutzerspezifikationen

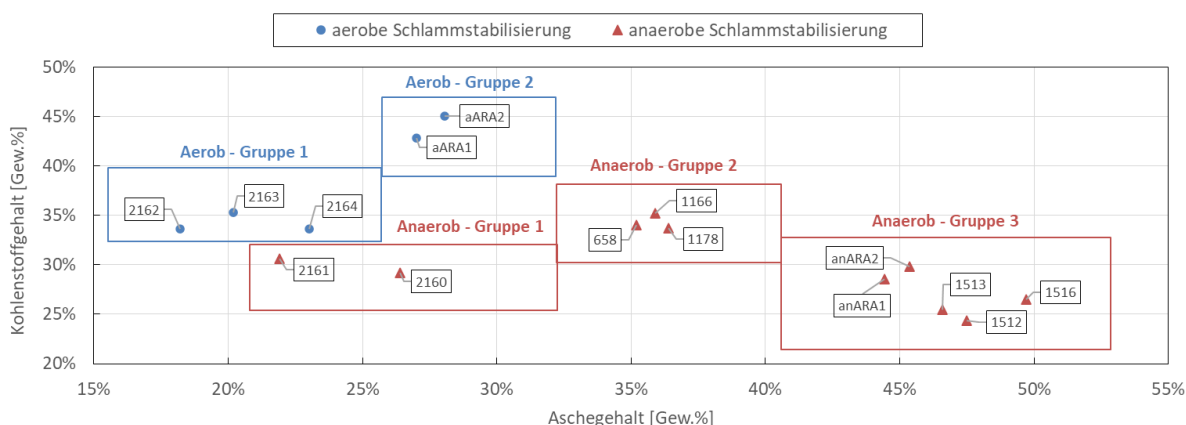
Im Rahmen der Nutzerspezifikationen erfolgt die Auswahl des Aggregates zur thermischen Klärschlammverwertung. Hier kann sowohl eine Verwertung mittels Verbrennung als auch mittels Vergaser definiert werden. Bei Auswahl einer Vergasung erfolgt in einem nächsten Schritt die Definition des Verwertungsaggregates für das Produktgas. Verwertungskonzepte mit BHKW oder HK inkl. Organic Rankine Cycle (ORC) stehen zur Verfügung. Die zugehörigen nutzerspezifisch definierbaren Inputparameter sind in Tabelle 10-37 (S.233) ersichtlich.

5.4.4.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – Theoretischer Hintergrund

Der NS-Massenstrom nach Trocknung  $\dot{m}_{TS,NSnT}$  wird dem thermischen Verwertungsaggregat zugeführt. Hier wird angenommen, dass keine Massenverluste auftreten. Zur Berechnung des Heizwertes, sowie zur Ermittlung der Produktgaszusammensetzung ist eine elementare NS-Zusammensetzung erforderlich. Diese wird auf Basis einer Analyse realer Schlammzusammensetzungen und der aus dem System „kommunale ARA“ übergebenen Schlammfraktionen gemäß DWA-A 131 [74]  $X_{CSB,S}$  (= Konzentration des partikulären CSB),  $X_{TS,S}$  (= Konzentration der partikulären Stoffe),  $X_{aTS,S}$  (= Konzentration der partikulären anorganischen Stoffe) und  $X_{P,S}$  (= Konzentration des gebundenen Phosphors) in drei Schritten abgeschätzt. Die drei Schritte werden nachfolgend erläutert.

**SCHRITT 1: Analyse realer Schlammzusammensetzungen**

Im ersten Schritt erfolgt die Untersuchung von realen Schlämmen diverser Anlagenkonfigurationen und -größen, mit Fokus auf den Asche- und Kohlenstoffgehalt. In die Untersuchung einbezogen werden alle Schlämme, die eindeutig einer Belebungsanlage mit aerober oder anaerober Schlammstabilisierung entstammen. Zudem dürfen keine speziellen Schlammbehandlungsverfahren zugrunde liegen, um eine Vergleichbarkeit mit den in OPTIEVLEX hinterlegten Verfahren gewährleisten zu können. Die mit Nummern gekennzeichneten Schlammproben werden einer Datenbank [129] entnommen. Die restlichen Schlammproben werden von Realanlagen unter Voraussetzung der Geheimhaltung des Anlagenstandortes für die vorliegende Dissertation zur Verfügung gestellt. Bei Einordnung der fünf aerob und zehn anaerob stabilisierten Schlämme nach Asche- und Kohlenstoffgehalt gemäß Abbildung 5-25 bilden sich fünf Schlammgruppen.



**Abbildung 5-25: Ermittlung von Schlammgruppen anhand des Asche- und Kohlenstoffgehaltes**

Die fünf Schlammgruppen, zwei aerob und drei anaerob, werden jeweils durch einen Schlamm repräsentiert, welcher die mittlere Immediat- und Elementarzusammensetzung aller der Schlammgruppe zugehörigen Schlämme aufweist. Die Zusammensetzung je Schlammgruppe ist in Tabelle 5-3 ersichtlich.

**Tabelle 5-3: Mittlere Immediat- und Elementarzusammensetzung der fünf Schlammgruppen**

Komponenten in [Gew.% (trocken)]	Aerob - Gruppe 1	Aerob - Gruppe 2	Anaerob - Gruppe 1	Anaerob - Gruppe 2	Anaerob - Gruppe 3
<b>Immediatanalyse</b>					
Asche	20,47	27,53	24,15	35,83	46,72
„Volatile Matter“ VM	72,53	66,60	68,85	53,00	47,70
„Fixed Carbon“ FC	7,00	5,87	7,00	11,17	5,58
<b>Elementaranalyse</b>					
Kohlenstoff C	34,17	43,92	29,90	34,30	26,96
Wasserstoff H	5,27	6,64	4,80	4,94	4,48
Stickstoff N	5,27	4,36	2,95	4,96	3,58
Chlor Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23
Schwefel S	1,67	1,54	1,00	1,20	1,03
Sauerstoff O	33,17	16,00	37,20	18,80	16,99

## SCHRITT 2: Überführung der Nutzschlammfraktionen nach DWA-A 131

Die Abschätzung des Kohlenstoffgehaltes (Gew.%) erfolgt gemäß der Formel (5-39) auf Basis des  $X_{CSB,S}$ , des  $X_{TS,S}$ , sowie der Molmassen von C  $MM_C$  und  $O_2$   $MM_{O_2}$ .

$$\text{Kohlenstoffgehalt} = \left( \frac{X_{CSB,S} * MM_C}{MM_{O_2} * \text{Anzahl } O_2 - \text{Atome}} \right) * \frac{1}{X_{TS,S}} \quad (5-39)$$

Die Abschätzung des Aschegehaltes (Gew.%) basiert auf der Formel (5-40), unter Berücksichtigung der Konzentrationen  $X_{TS,S}$ ,  $X_{aTS,S}$  und  $X_{P,S}$ .

$$\text{Aschegehalt} = \frac{X_{aTS,S} + X_{P,S}}{X_{TS,S}} \quad (5-40)$$

Hier gilt zu beachten, dass beide Formeln nur einer groben Abschätzung dienen, um eine Grundlage für die in Schritt 3 vorgenommene Zuordnung zu schaffen.

SCHRITT 3: Zuordnung einer Schlammgruppe

Der in Schritt 2 ermittelte Kohlenstoff- und Aschegehalt dienen in weiterer Folge der Zuordnung des mit OPTIEVLEX ermittelten Nutzschlammes inkl. Schlammfraktionen zu einer Schlammgruppe. Liegt entsprechend der Nutzerspezifikationen in OPTIEVLEX eine ARA mit aerober Stabilisierung vor, stehen zwei Schlammgruppen für die Zuordnung zur Verfügung. Liegt eine ARA mit anaerober Stabilisierung vor können drei Schlammgruppen zur Zuordnung herangezogen werden. Die den Schlammgruppen hinterlegten Zusammensetzungen nach Tabelle 5-3 dienen als Basis für die weiteren Berechnungsansätze des Moduls „Klärschlammnutzung“. Die Berechnung der elektrischen  $E_{el,A,KSN}$  und thermischen  $E_{th,A,KSN}$  Energieaufbringung mittels thermischer Klärschlammverwertung wird nachfolgend je Verwertungsoption näher erläutert.

NUTZSCHLAMMVERBRENNUNG EXKLUSIVE UND INKLUSIVE ORC

Die Ermittlung der jährlichen mittleren thermischen Leistung und der jährlichen thermischen Energieaufbringung  $E_{th,A,KSN}$  der NS-Verbrennung erfolgt näherungsweise auf Basis der Bilanzgleichung nach Formel (5-41). [126]

$$\dot{Q}_{RG} = \dot{Q}_B + \dot{Q}_L - \dot{Q}_{AG} - \dot{Q}_S - \dot{Q}_A \quad (5-41)$$

Die Brennstoffwärmeleistung  $\dot{Q}_B$  wird unter Berücksichtigung des unteren Heizwertes  $H_u$  je nach Schlammzusammensetzung gemäß der Formel (5-30) berechnet. Bei Annahme einer vollständigen Verbrennung werden die Abgasverluste  $\dot{Q}_{AG}$  nach der Formel (5-33) ermittelt. Die Luftwärmeleistung  $\dot{Q}_L$  und die Strahlungsverluste  $\dot{Q}_S$  werden mit den Formeln (5-35) und (5-36) bestimmt. Der Verlustwärmeleistung aufgrund des Aschemassenstromes  $\dot{Q}_A$  wird mittels der Formel (5-42) berechnet. Die zugehörigen Literaturwerte sind in Tabelle 10-36 (S.232) ersichtlich.

$$\dot{Q}_A = \dot{m}_A * \overline{c_{p,A}}^{T_{A,e}} * (T_{A,e} - T_u) \quad (5-42)$$

Bei Nutzung der Abwärme in einem ORC-Prozess wird die bereitgestellte elektrische  $E_{el,A,KSN}$  und thermische  $E_{th,A,KSN}$  Energiemenge auf der Basis von Wirkungsgraden nach Schuster et al. [130] ermittelt. Hier wird ein elektrischer Wirkungsgrad von 13 – 16 % und ein thermischer Wirkungsgrad von 54 – 57 % angenommen.

## NUTZSCHLAMMVERGASUNG

Die dezentrale Klärschlammvergasung stellt keinen Stand der Technik dar. Um eine ausreichende Datengrundlage zur Integration von Vergasungskonzepten in OPTIEVLEX gewährleisten zu können, wurde am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik der Montanuniversität Leoben in Zusammenarbeit mit der KOPF SynGas GmbH & Co. KG [65, 66] ein Simulationsmodell des dort designten autothermen 2-stufigen Schwebebett-Vergasungsprozesses entwickelt. Der Aufbau des Modells, die damit durchgeführten Analysen und die in OPTIEVLEX inkludierten Analyseergebnisse werden in Kapitel 5.5 näher erläutert. Zudem beinhaltet das Kapitel die Modellierung der Produktgasverwertung, welche mit der KOPF SynGas GmbH & Co. KG abgestimmt wurde.

### 5.4.4.3 Modulergebnisse

Der Abgasmassenstrom  $\dot{m}_{AG}$  stellt einen internen Massestrom dar, da er keine Relevanz für weitere Module aufweist. Bei stationären Analysen wird zudem der jährliche Aschemassenstrom  $\dot{m}_A$  berechnet, welcher einer externen Verwertung oder Deponierung zugeführt werden kann. Hinsichtlich der Energiebilanz werden bei stationären Analysen der jährliche Elektrizitäts-  $E_{el,KSN}$  und Wärmebedarf  $E_{th,KSN}$  der Verwertungsprozesse, sowie die jährliche aufgebrauchte elektrische  $E_{el,A,KSN}$  und thermische  $E_{th,A,KSN}$  Energiemenge ausgegeben. Bei Flexibilitätsanalysen erfolgt die Übergabe von mittleren Leistungen je Zeitschritt an das Steady-State-Teilmodell 1.

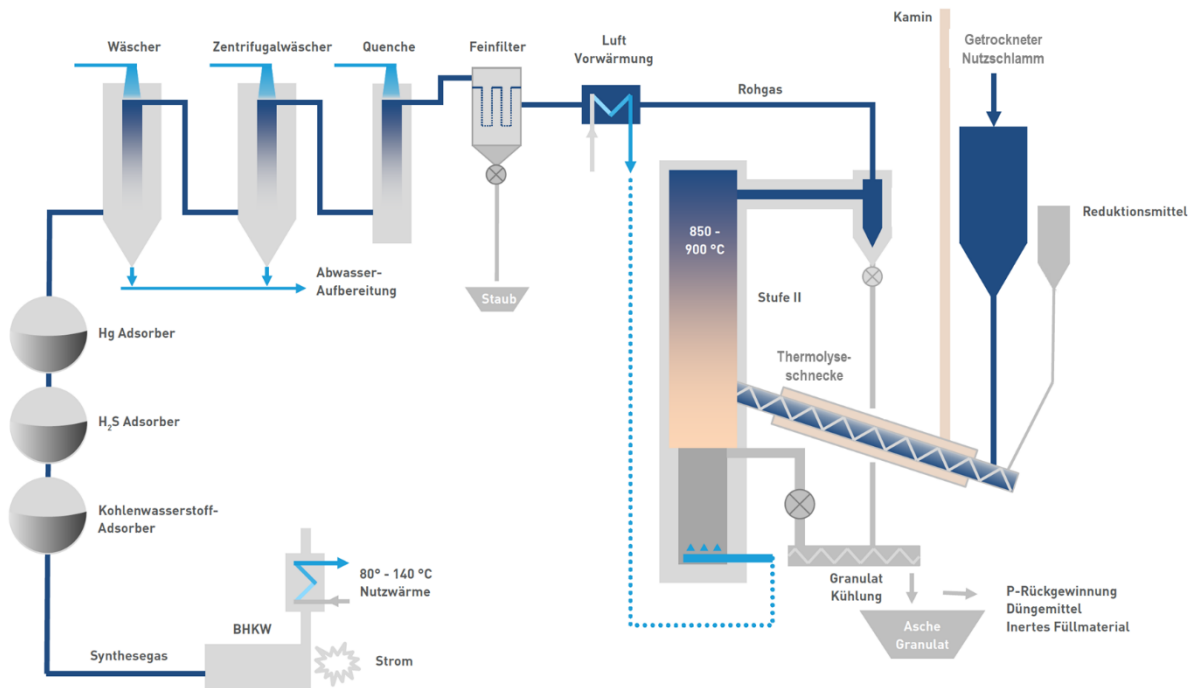
## **5.5 Schritt 2-1: Thermodynamische Simulation des Vergaserprozesses mittels Aspen Plus**

Die Beschreibung des Konzeptes zur thermischen Klärschlammvergasung der KOPF SynGas GmbH & Co. KG, sowie des entwickelten Simulationsmodells erfolgt in den nachfolgenden Unterkapiteln. Zudem wird die Einbindung der Simulationsergebnisse in OPTIEVLEX erläutert.

### **5.5.1 Kopf SynGas Konzepte zur thermischen Klärschlammvergasung**

Die Kopf SynGas GmbH & Co. KG bietet skalierbare Module zur thermischen Klärschlammvergasung mit Durchsatzleistungen von 1.000 - 15.000 t Trockensubstanz pro Jahr. Neben dem BHKW-Modul wird ein Heat-Modul angeboten, wobei letzteres zusätzlich mit einem ORC erweitert werden kann. Das Kernelement aller Module ist ein stationärer Schwebebettvergaser, welcher den Energieträger Produktgas (PG) als Output liefert. Je nach Modul kann bei der thermischen Verwertung des Produktgases, die Bereitstellung von Wärme (Heat-Modul) oder Strom (BHKW-Modul) fokussiert werden. Hier gilt zu beachten, dass das Heat-Modul inklusive ORC ebenfalls elektrische Energie bereitstellt, wobei dies zur Senkung

des Temperaturniveaus der Abwärme führt. So stellt das Heat-Modul ohne ORC Hochtemperatur-Wärme (bezieht sich auf Wasser bei 140°C als Energieträgermedium) bereit, während das Modul mit ORC Mitteltemperatur-Wärme (bezieht sich auf Wasser bei 90°C als Energieträgermedium) liefert. Abbildung 5-26 zeigt das Verfahrensschema des BHKW-Moduls. [65, 66, 131]



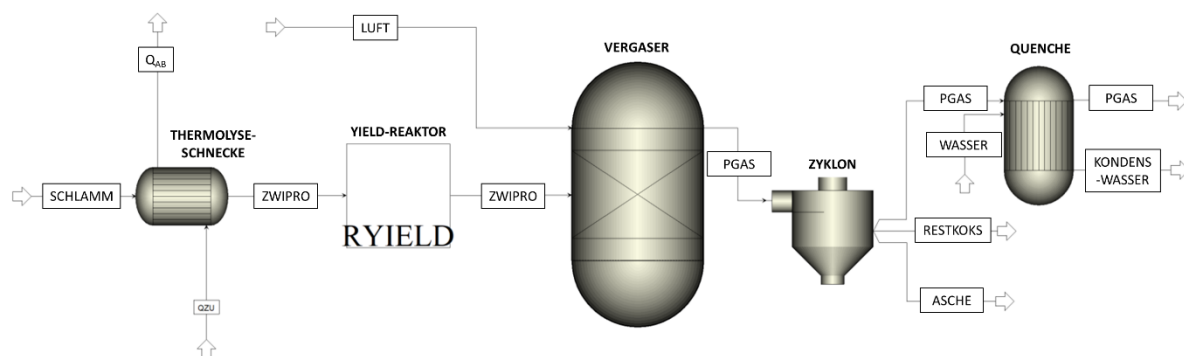
**Abbildung 5-26: Verfahrensschema des BHKW-Moduls der Kopf SynGas GmbH & Co. KG zur thermischen Klärschlammverwertung [65]**

Die Module dienen der Verwertung von aerob oder anaerob stabilisiertem Nutzschlamm mit einem Trockengehalt von 85 – 95 %. Vor allem granulierter Nutzschlamm aus Bandtrocknern, welcher meist durch eine definierte Korngrößenverteilung und einen geringen Staubanteil gekennzeichnet ist, weist eine besondere Eignung auf. Der Schlamm wird mit Kalkstein in den Schwebebettvergaser eingebracht, in welchem die organische Fraktion bei rund 870°C, leichtem Überdruck (< 500 mbar(g)) und unterstöchiometrischen Bedingungen ( $\lambda$  ca. 0,3) in die Gasphase überführt wird. Der Vergasungsprozess ist autotherm und kann ohne zusätzliche Energiezufuhr betrieben werden. Im BHKW-Modul wird der Nutzschlamm vor dem Schwebebettvergaser einer Thermolyseschnecke zugeführt. Diese dient einer vorgeschalteten Pyrolyse des Schlammes bei 600°C. Der zweistufige Prozess verfolgt das Ziel den Teergehalt im PG zu reduzieren, um Schäden in Gasmotoren zu vermeiden. Im Falle des Wärmemoduls ist dies nicht notwendig, da das PG einem Heizkessel zugeführt wird. Das PG weist je nach Klärschlammzusammensetzung und -trockengehalt einen unteren Heizwert von etwa 3,4 bis 6,3 MJkg<sup>-1</sup> auf.

Alle Module verfügen über eine Gasreinigung, wobei diese im Falle des BHKW-Moduls zum Schutz des Motors vollständig vor der PG-Verwertung erfolgt. Zudem besitzen alle Module einen kontinuierlichen Ascheaustrag. Rund 70 Gew.% der Asche werden als Granulat aus dem Prozess entfernt, während die restlichen 30 Gew.% als Staub vorwiegend im Zyklon (25 Gew.%) und im Heißgasfilter (5 Gew.%) ausgeschieden werden. [131]

## 5.5.2 Simulationsmodell in Aspen Plus

Das Simulationsmodell, erstellt mit der Software Aspen Plus [98], dient der Abbildung des im Kapitel 5.5.1 beschriebenen zweistufigen Vergasungsprozesses inkl. Gasreinigung. Das Modell basiert auf dem Simulationsmodell eines Holzvergasers nach Kienberger [132] und wurde am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik zur Simulation der Nutzschlammvergasung angepasst. Hinsichtlich der Modellanpassung sind drei Maßnahmen besonders hervorzuheben. Die Integration der Thermolyseschnecke, stellt die erste Maßnahme dar. Die zweite Maßnahme beinhaltet die Änderung der Prozessparameter (Temperatur und Systemdruck) im Vergaser, um das BHKW-Modul abbilden zu können. Die Entfernung der Stickstoffspülung und des Methanierungsreaktors aus dem Simulationsmodell nach Kienberger [132] ist als dritte Maßnahme anzuführen. Der Aufbau des Modells ist in der Abbildung 5-27 ersichtlich.



**Abbildung 5-27: Aspen Plus Simulationsmodell des BHKW-Moduls der Kopf SynGas GmbH & Co. KG zur thermischen Klärschlammvergasung**

Als Input für das Simulationsmodell dienen die Immediat- und Elementarzusammensetzung des Nutzschlammes. Der NS-Massenstrom nach Trocknung  $\dot{m}_{f,NSnT}$  mit einem Wassergehalt von maximal 25 % wird im ersten Schritt der Thermolyseschnecke zugeführt. Diese wird mittels eines Wärmeübertragers berücksichtigt, in welchem der Schlamm bei einem Systemdruck von 1,3 bar auf eine Temperatur von 600°C aufgeheizt wird. Die Wärmezufuhr wird im Modell extern bereitgestellt, um eine Ermittlung des Wärmestromes zu ermöglichen. In Realität wird die Abwärme aus dem Produktgas nach der Grobentstaubung, sowie Abwärme aus dem BHKW oder Heizkessel genutzt. Dies wird in der Wärmebilanz berücksichtigt. Zudem erfolgt im realen Prozess bereits in der Thermolyseschnecke eine Pyrolyse des

Nutzschlammes. Der nachfolgende Schwebbettvergaser wird mittels eines Gibbs-Reaktors abgebildet, welcher einem Gleichgewichtsansatz folgt. Hier werden alle Inputkomponenten bei 1,3 bar und 870°C in ein thermodynamisches Gleichgewicht gebracht. Um die Berechnungen durchführen zu können, werden die Massenprozentante von C, H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> benötigt, welche mit Hilfe des Yield-Reaktors aus der Elementaranalyse ermittelt werden. Zur Berücksichtigung der nicht vollständig ablaufenden Methanreformierungsreaktion, sowie der unvollständigen Umsetzung von Restkoks, wird eine Limitierung des CH<sub>4</sub>- (6,5 %) und des Restkoksgehaltes (3,9 %) gemäß Kienberger [132] vorgenommen. Die Gasreinigung, zur Abtrennung von Restkoks und Asche, wird mittels eines Zyklons und einer Quenche simuliert.

### 5.5.3 Analysen mit Aspen Plus

Da eine direkte Zusammenführung von OPTIEVLEX mit dem Simulationsmodell in Aspen Plus [98] nicht durchführbar ist, werden Resultate aus separaten Analysen mit Aspen Plus mittels Kennlinien in OPTIEVLEX eingebunden. Als Basis für die Analysen gelten die NS-Zusammensetzungen nach Schlammgruppen gemäß Tabelle 5-3. Um unterschiedliche TG zu berücksichtigen werden die PG-Zusammensetzungen, sowie der PG-  $\dot{m}_{PG}$  und Aschemassenstrom  $\dot{m}_{TS,A}$  für alle fünf Schlammgruppen bei variierendem Wassergehalt ermittelt. Es erfolgt die Annahme von Wassergehalten von 5 – 25 Gew.% in 5 % Schritten. Der maximale Wassergehalt von 25 % ist auf die erforderlichen Rahmenbedingungen in der Realanlage zurückzuführen. Die Ergebnisse der Analysen mit Aspen Plus dienen in OPTIEVLEX als Grundlage für weitere Berechnungen zur ARA-internen thermischen Verwertung des Produktgases. Die in OPTIEVLEX integrierten PG-Verwertungsoptionen und deren Modellierung werden nachfolgend erläutert. Die Kennlinien sind in Abbildung 10-1 bis Abbildung 10-4 (S.234 - 235) ersichtlich.

#### BLOCKHEIZKRAFTWERK (BHKW)

Unter Berücksichtigung des TG des NS-Massenstromes  $\dot{m}_{f,NSnT}$ , wird der PG-Massenstrom  $\dot{m}_{PG}$  und dessen Zusammensetzung gemäß Kennlinien entnommen. Die darauf basierende Ermittlung der bereitgestellten elektrischen und thermischen Energiemenge des PG-BHKWs wird analog zum FG-BHKW (siehe Kapitel 5.4.2.2) durchgeführt. Hier gilt zu beachten, dass nach Absprache mit Experten der Kopf SynGas GmbH & Co. KG angenommen wird, dass sich die Wirkungsgrade gemäß DWA-A 216 [17] aufgrund der PG-Zusammensetzung und -Reinheit um 10 % reduzieren. Die Wirkungsgrade sind in Tabelle 10-38 (S.233) ersichtlich.



## HEIZKESSEL EXKLUSIVE UND INKLUSIVE ORC (HK und HK-ORC)

Der HK wird analog zum Kapitel 5.4.2.2 berechnet. Bei Nutzung der Wärmeleistung des Abgases  $\dot{Q}_{AG}$  in einem ORC-Prozess wird die elektrische  $E_{el,A,KS_N}$  und thermische  $E_{th,A,KS_N}$  Energieaufbringung auf der Basis von Wirkungsgraden nach Schuster et al. [130] ermittelt. Hier wird ein elektrischer Wirkungsgrad von 13 – 16 % und ein thermischer Wirkungsgrad von 54 – 57 % angenommen.

### **5.6 Schritt 3: Erstellung des Steady-State-Teilmodell 1**

Zur Einsatzplanung von Flexibilitäten im elektrischen Netz werden zeitlich aufgelöste Jahreslast- und -aufbringungsprofile, sowie zeitlich aufgelöste Flexibilitätpotentiale der bereitstellenden kommunalen ARA benötigt. Zur Erstellung zeitlich aufgelöster Jahreslast- und -aufbringungsprofile wird in Schritt 3 das Steady-State-Teilmodell 1 mittels MATLAB [97] entwickelt. Dieses verknüpft das stationäre Massen- und Energiebilanzmodell des Systems „Energieverbund“ mit zeitlich aufgelösten Jahreszulauf- und -konzentrationsprofilen für kommunale ARAs, sowie Betriebszeiten der im System „Energieverbund“ inkludierten Module. Zudem dient der Modellierungsschritt der Identifikation der flexiblen Lasten und Aufbringungseinheiten zur Ermittlung des zeitlich aufgelösten theoretischen Flexibilitätpotentials.

Die nachfolgenden Unterkapitel erläutern die Systemgrenzen des Steady-State-Teilmodells 1, sowie dessen Aufbau. Der Überblick zum Aufbau und Simulationsablauf in Kapitel 5.6.2 dient der Einordnung der Modellblöcke, welche in den Kapiteln 5.6.3 bis 5.6.5 genauer dargestellt werden. Die Modellblöcke werden hinsichtlich der möglichen Nutzerspezifikationen, dem theoretischen Hintergrund und den damit ermittelbaren Ergebnissen betrachtet.

#### **5.6.1 Systemgrenzen**

Das Steady-State-Teilmodell 1 baut auf dem stationärem Massen- und Energiebilanzmodell des Systems „Energieverbund“ (siehe Abbildung 5-1) auf und bezieht sich daher auf dessen Systemgrenzen. Details dazu sind im Kapitel 5.4.1 ersichtlich.

#### **5.6.2 Überblick zum Aufbau des Steady-State-Teilmodells 1**

Abbildung 5-28 zeigt den Aufbau des Steady-State-Teilmodells 1. Das Modell basiert auf drei Simulationsblöcken, welche über Datenschleifen miteinander und mit dem stationären Massen- und Energiebilanzmodell verbunden sind. Die Zahlen bei den Datenschleifen stellen den Simulationsablauf dar. Dieser dient der Überführung der jährlichen mittleren Leistungen je Zeitschritt aus dem stationären Massen- und Energiebilanzmodell in zeitlich aufgelöste Jahreslast- und -aufbringungsprofile, sowie theoretische Flexibilitätpotentiale.

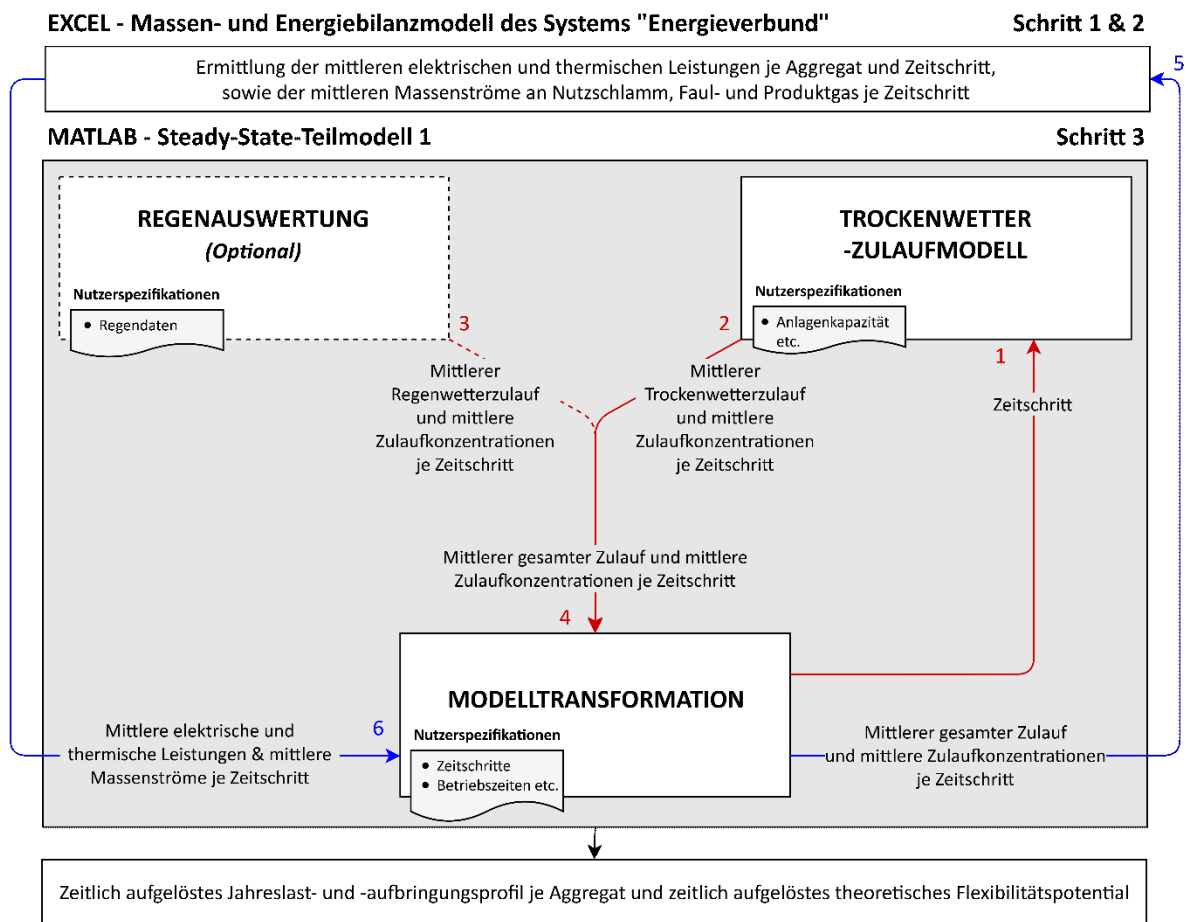


Abbildung 5-28: Aufbau und Ablaufschema zum Steady-State-Teilmodell 1

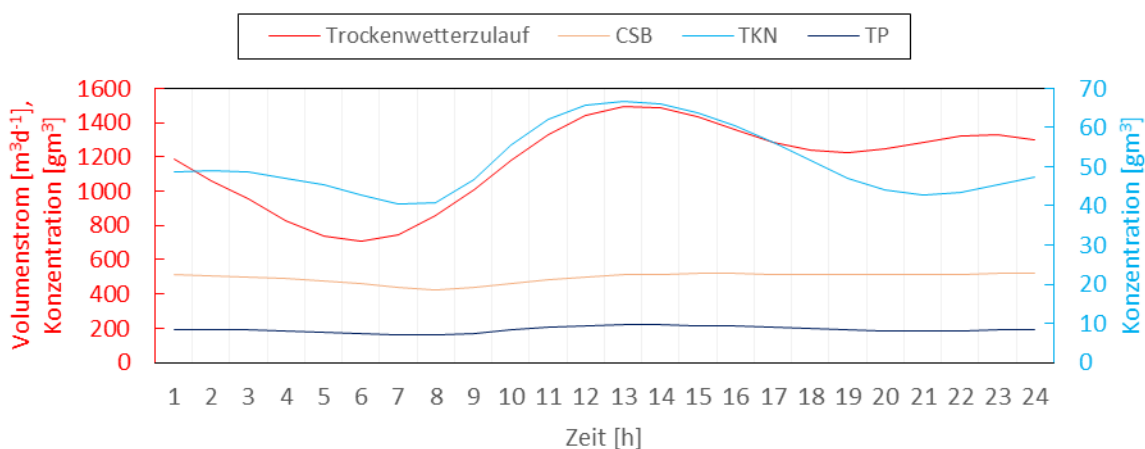
Das Steady-State-Teilmodell 1 beinhaltet gemäß Abbildung 5-28 die Blöcke „Trockenwetter-Zulaufmodell“, „Regenauswertung“ und „Modelltransformation“. Die den einzelnen Blöcken zugeordneten nutzerspezifisch definierbaren Inputparameter dienen in den jeweiligen Blöcken als Datengrundlage für weitere Simulationsschritte. Details zu den Nutzerspezifikationen können in den Kapiteln 5.6.3 bis 5.6.5 nachgelesen werden. Nach Eingabe der Nutzerspezifikationen liefert der Block „Modelltransformation“ in **Schritt 1** den gewählten Zeitschritt (15 min, 30 min oder 60 min) an den **Block „Trockenwetter-Zulaufmodell“**. Dieser dient der Erstellung zeitlich aufgelöster Jahreszulauf- und -konzentrationsprofile auf der Basis eines zeitlich aufgelösten Trockenwetter-Tageszulaufprofils nach dem Ansatz von Langergraber et al. [100]. Der mittlere Trockenwetterzulauf (= Volumenstrom) und die mittleren Zulaufkonzentrationen (CSB, TN und TP) je Zeitschritt werden in **Schritt 2** dem Block „Modelltransformation“ übergeben. Der **Block „Regenauswertung“** ist optional und überführt minütlich aufgelöste Jahresregendaten für das Einzugsgebiet einer kommunalen ARA, in ein je nach definiertem Zeitschritt aufgelöstes Jahresregenzulauf und -konzentrationsprofil für die kommunale ARA. Daraus wird in **Schritt 3** der mittlere Regenwetterzulauf (= mittlerer Volumenstrom) und die mittleren Regenzulaufkonzentrationen (CSB, TN und TP) je Zeitschritt entnommen und in **Schritt 4** im

**Block „Modelltransformation“** dem Trockenwetterzulauf zugerechnet. Der gesamte zulaufende mittlere Volumenstrom und dessen mittlere CSB-, TN- und TP-Konzentrationen je Zeitschritt werden vom Block „Modelltransformation“ in **Schritt 5** in das stationäre Massen- und Energiebilanzmodell eingesetzt. Dies dient der Berechnung der mittleren elektrischen und thermischen Leistungen je Aggregat und Zeitschritt, welche in **Schritt 6** vom Block „Modelltransformation“ abgerufen werden. Die abgerufenen mittleren Leistungen je Zeitschritt werden in weiterer Folge zeitlich angeordnet zu einem Jahreslast- und -aufbringungsprofil je Aggregat zusammengeführt. Hier gilt zu erläutern, dass die zeitliche Anordnung anhand von nutzerspezifizierten Betriebszeiten der im System „Energieverbund“ inkludierten Module erfolgt (siehe Tabelle 10-39). Zudem werden die mittleren Massenströme Zulauf, Faulgas, Nutzschlamm, Asche und Produktgas je Zeitschritt in Schritt 5 entnommen, um die ARA- und Speicherauslastung modellieren zu können. Die zeitlich aufgelösten Jahreslast- und -aufbringungsprofile der im Block „Modelltransformation“ festgelegten flexiblen Lasten und Aufbringungseinheiten dienen in weiterer Folge als Basis, um das zeitlich aufgelöste theoretische Flexibilitätspotential darstellen zu können.

### 5.6.3 Block „Trockenwetter-Zulaufmodell“

Zeitlich aufgelöste Jahreszulauf- und -konzentrationsprofile eines Energieverbundes sind essenziell, um zeitlich aufgelöste Energie- und Flexibilitätsprofile generieren zu können. Liegen keine zeitlich aufgelösten realen Jahreszulauf- und -konzentrationsprofile vor, wird in OPTIEVLEX der auf Literaturdaten basierender Ansatz gemäß Langergraber et al. [100] zur Ermittlung der Jahreszulauf- und -konzentrationsprofile bei Trockenwetter herangezogen. Details dazu sind den nachfolgenden Unterkapiteln zu entnehmen.

#### 5.6.3.1 Nutzerspezifikationen und Berechnungsansatz in OPTIEVLEX



**Abbildung 5-29: Exemplarische Trockenwetter-Tagesprofile des Zulaufvolumenstromes und der Zulaufkonzentrationen einer kommunalen ARA der GK 5 (rund 100.000 EW) – Primärachse: Trockenwetterzulauf und CSB-Konzentration; Sekundärachse: TKN- und TP-Konzentration**

Der Ansatz gemäß Langergraber et al. [100] basiert auf Daten, die aus Auslegungsberechnungen bekannt sind und bietet ein anhand von Realdaten validiertes Tagesprofil des zulaufenden Abwasservolumenstroms, sowie der CSB-, TKN- (Total Kjeldahlstickstoff = organischer Stickstoff +  $\text{NH}_4$ ) und TP-Konzentrationen bei Trockenwetter. Exemplarische Tagesprofile für eine kommunale ARA der GK 5 (ca. 100.000 EW) sind in Abbildung 5-29 dargestellt. Erforderliche Nutzerspezifikationen für das Modell nach Langergraber et al. sind die Ausbaupazität in EW, der zulaufende mittlere tägliche Trockenwettervolumenstrom in  $\text{m}^3\text{d}^{-1}$  und die mittleren täglichen CSB-, TKN- und TP-Konzentrationen in  $\text{gm}^{-3}$ . Die Parameter werden in OPTIEVLEX nutzerspezifisch definiert, oder der Literatur entnommen (siehe Tabelle 5-2). Hier gilt zu erwähnen, dass die TKN-Konzentration aus der in OPTIEVLEX einzugebenden TN-Konzentration (Gesamtstickstoff) nach dem DWA-Arbeitsblatt DWA-A 131 [74] ermittelt wird. Die weiteren erforderlichen Nutzerspezifikationen, wie beispielsweise die Volumenströme und Konzentrationen von Infiltrationswasser und Urin, sowie die zeitliche Aufteilung von maximalen und minimalen Volumenströmen, wird in OPTIEVLEX nach Langergraber et al. [100] angenommen.

### 5.6.3.2 Blockergebnisse

Der Block „Trockenwetter-Zulaufmodell“ liefert den mittleren Trockenwetterzulauf (= mittlerer Volumenstrom) und die mittleren Zulaufkonzentrationen (CSB, TN und TP) je Zeitschritt an den Block „Modelltransformation“.

## 5.6.4 Block „Regenauswertung“

Der Block „Regenauswertung“ ist optional bei einer gewünschten Integration von Regendaten zu aktivieren und dient der Verknüpfung der zeitlich aufgelösten Jahreszulauf- und -konzentrationsprofile bei Trockenwetter mit zeitlich aufgelösten Jahresregenprofilen.

### 5.6.4.1 Nutzerspezifikationen und Berechnungsansatz in OPTIEVLEX

Um den Einfluss von Regenereignissen auf die zeitlich aufgelösten elektrischen Flexibilitätspotentiale zu ermitteln, erfolgt in OPTIEVLEX die Integration von Regendaten des Einzugsgebietes der jeweiligen kommunalen ARA. Dabei werden minütlich aufgelöste Daten des Einzugsgebietes zur sogenannten Regenspende  $r$  in mm bzw.  $\text{lm}^{-2}$  für ein Jahr in Form einer EXCEL-Liste [96] berücksichtigt. Stehen keine anlagenspezifischen Daten zur Verfügung ist in OPTIEVLEX eine Datei zur Integration hinterlegt, welche die Regenspende einer mittelgroßen österreichischen Stadt (ca. 25.000 Einwohner) im Jahr 2014 abbildet. Die Regenspende dient als Basis zur Berechnung des in die Kanalisation abfließenden Regenwasservolumenstromes  $\dot{V}_R$  in  $\text{m}^3$  je Minute gemäß der Formel (5-43) [26].

$$\dot{V}_R = \psi * \frac{r}{1.000} * A_E \quad (5-43)$$

Dabei ergibt sich der Volumenstrom aus dem Produkt des konstanten Abflussbeiwerts  $\psi$ , der Regenspende und der Fläche des besiedelten Einzugsgebietes  $A_E$  der ARA. Der konstante Abflussbeiwert repräsentiert dabei die Güte einzelner Bebauungsarten Regenwasser in das Kanalisationssystem abzuleiten und wird nach der Formel (5-44) ermittelt.

$$\psi = \frac{A_{VF} * \psi_{VF} + A_{FI} * \psi_{FI} + A_{DSR} * \psi_{DSR} + A_{RLF} * \psi_{RLF}}{A_{LF}} \quad (5-44)$$

Da sich eine Erhebung der einzelnen Flächen und Beiwerte für jede spezifische ARA zeit- und datenintensiv darstellt, wird im Rahmen von OPTIEVLEX eine generalisierte Berechnung mit Bezug auf österreichische Statistiken durchgeführt. Die Flächen und zugehörigen angenommenen Beiwerte für Österreich im Jahr 2019 sind in Tabelle 5-4 ersichtlich.

**Tabelle 5-4: Parameter zur Ermittlung des Abflussbeiwertes**

Bezeichnung	Akronym	Fläche [km <sup>2</sup> ] [133]	Beiwert $\psi$ [26]
Versiegelte Fläche	VF	2.354	0,80
Flächeninanspruchnahme ohne VF	FI	3.375	0,35
Dauersiedlungsraum ohne VF und FI	DSR	25.485	0,01
Restliche Landesfläche	RLF	52.669	0,00
Landesfläche	LF	83.883	-

Das Einzugsgebiet der ARA wird ebenfalls generalisiert mit der Formel (5-45) berechnet. Hier wird die Fläche pro Einwohnerwert aus der österreichischen Landesfläche  $A_{LF}$  und dem Einwohnerwert aller österreichischen kommunalen ARAs  $EW_{ges}$  (31.800.000 EW [19]) ermittelt und mit dem jeweiligen Einwohnerwert der zu untersuchenden ARA multipliziert.

$$A_E = \frac{A_{VF} + A_{FI} + A_{DSR}}{EW_{ges}} * EW \quad (5-45)$$

Nach Ermittlung der abfließenden Regenwassermenge je Minute erfolgt je nach definiertem Zeitschritt eine Aufsummierung von 15, 30 oder 60 Minutenwerten. Die mittlere Regenwassermenge je Zeitschritt wird in weiterer Folge dem mittleren Trockenwetterzulauf je Zeitschritt zugerechnet (siehe Abbildung 5-28). Hier gilt zu beachten, dass es sich bei dieser Betrachtung um eine dem Dissertationsziel ausreichende Abschätzung der zufließenden Regenmenge handelt. Die Berechnung ersetzt keine detaillierten Untersuchungen bzw. Messwerte. Sind Messwerte hinsichtlich des Zulaufes inkl. Regenwasser vorhanden sind diese, anstatt der generalisierten Berechnungen in OPTIEVLEX zu integrieren.

Zudem wird angenommen, dass das Regenwasser die Zusammensetzung des kommunalen Abwassers aufweist (siehe Tabelle 5-2). In der Realität kann die Zusammensetzung des Regenwassers jedoch von der eines kommunalen Abwasser abweichen. Dies kann zu Abweichungen bei den Jahreslast- und -aufbringungsprofilen, sowie bei den theoretischen und realisierbaren Flexibilitätspotentialen führen. Die Berücksichtigung abweichender Zusammensetzungen erfolgt über die nutzerspezifisch definierbaren Konzentrationswerte.

### 5.6.4.2 Blockergebnisse

Der Block „Regenauswertung“ liefert den mittleren Regenwetterzulauf (= mittlerer Volumenstrom) und dessen mittlere CSB-, TN- und TP-Konzentrationen je Zeitschritt an den Block „Modelltransformation“.

## 5.6.5 Block „Modelltransformation“

Der Block „Modelltransformation“ stellt das Kernelement des Steady-State-Teilmodells 1 dar. Er verknüpft das stationäre Massen- und Energiebilanzmodell mit dem Steady-State-Teilmodell 1 zur Berechnung zeitlich aufgelöster Jahreslast- und -aufbringungsprofile. Zudem dient der Block der Identifikation der flexiblen Aggregate zur Ermittlung des zeitlich aufgelösten theoretischen und realisierbaren elektrischen Flexibilitätspotentials.

### 5.6.5.1 Nutzerspezifikationen

Ein Graphical User Interface ermöglicht die Verknüpfung des stationären Massen- und Energiebilanzmodells des Systems „Energieverbund“ mit dem Steady-State-Teilmodell 1. Zudem dient es der Auswahl des Zeitschrittes (15 min, 30 min oder 60 min) und der Art der Simulation. Dabei kann zwischen einer Jahressimulation bei Trockenwetter und einer Jahressimulation unter Einbezug von Jahresregendaten gewählt werden. Zudem wird die Spezifikation der Betriebszeiten der im System „Energieverbund“ inkludierten Module (siehe Abbildung 5-1) ermöglicht. Die Berücksichtigung der Betriebszeiten energieintensiver Aggregate der Module ermöglicht eine Annäherung an reale Profile, was die Repräsentativität der Jahreslast- und -aufbringungsprofile, sowie der zeitlich aufgelösten Flexibilitätspotentiale erhöht. Die wählbaren Betriebszeiten der Aggregate basieren auf den Volllastenstunden gemäß Schäfer et al. [11] (siehe Tabelle 2-3), wobei je nach vorab gewähltem Zeitschritt bis zu sechs Optionen je Aggregat zur Verfügung stehen. Zum Beispiel können bei diskontinuierlich betriebenen Aggregaten festgelte Betriebszeiten, wie z.B. beim Rechnen von 8 – 10 Uhr und von 14 – 16 Uhr, oder ein On-Off-Betriebsverhalten gewählt werden. Letzteres bedeutet, dass das Aggregat, z.B. das Zulaufpumpwerk, immer in 30 min-Zeitschritten ein- und ausgeschaltet wird. Details zu den Spezifikationsmöglichkeiten sind im Anhang in Tabelle 10-39 (S.236) ersichtlich.

### 5.6.5.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – Theoretischer Hintergrund

Gemäß Abbildung 5-28 ermittelt der Block „Modelltransformation“ in Schritt 4 den gesamten dem „Energieverbund“ zulaufenden mittleren Volumenstrom und dessen mittlere CSB-, TN- und TP-Konzentration je Zeitschritt. Die Zulaufparameter werden in Schritt 5 in das stationäre Massen- und Energiebilanzmodell des Systems „Energieverbund“ eingesetzt, um die mittleren elektrischen und thermischen Leistungen je Aggregat und Zeitschritt zu berechnen. Zudem werden die mittleren Massenströme Zulauf, Faulgas, Nutzschlamm, Asche und Produktgas je Zeitschritt ermittelt. Um bei Jahressimulationen saisonale Temperaturunterschiede und deren Auswirkung auf die Massen- und Energiebilanz berücksichtigen zu können, werden im Block „Modelltransformation“ charakteristische Außen- und Belebungsbeckentemperaturen für die einzelnen Jahreszeiten hinterlegt. Die Temperaturen sind in der Tabelle 5-5 aufgelistet.

**Tabelle 5-5: Luft- und Belebungsbeckentemperaturen in OPTIEVLEX nach Jahreszeiten**

Jahreszeit	Datumsgrenzen nach [134]	Lufttemperatur [°C] nach [135]	Belebungsbeckentemperatur [°C] nach [111]
Frühling	21.03. – 14.05.	10	16
Sommer	15.05. – 14.09.	20	18
Herbst	15.09. – 31.10.	10	16
Winter	01.11. – 20.03.	5	14

Die mittleren Leistungen und Massenströme je Zeitschritt werden in Schritt 6 vom Block „Modelltransformation“ aus dem stationären Massen- und Energiebilanzmodell abgerufen (siehe Abbildung 5-28). Die mittleren Leistungen je Zeitschritt werden in weiterer Folge zeitlich angeordnet zu einem Jahreslast- und -aufbringungsprofil je Aggregat zusammengeführt. Die zeitliche Anordnung erfolgt anhand der nutzerspezifisch definierten Betriebszeiten gemäß Tabelle 10-39. Die mittleren Massenströme dienen der Speichermodellierung. Hier wird die Annahme, dass die Faul- und Produktgasmassenströme konstant sind und keinen Tagesschwankungen unterliegen berücksichtigt.

Das zeitlich aufgelöste theoretische Flexibilitätspotential wird in weiterer Folge auf Basis der zeitlich aufgelösten Jahreslast- und -aufbringungsprofile der flexiblen Aggregate ermittelt. Positive Flexibilitäten ergeben sich hier auf Basis der abschaltbaren Leistung der jeweiligen flexiblen Last (z.B. Pumpe) je Zeitschritt. Die Erhöhung der Leistung einer flexiblen Aufbringungseinheit (z.B. BHKW) auf die maximale Nennlast ist ebenfalls mit der Bereitstellung von positiver Flexibilität verbunden. Negative Flexibilitäten ergeben sich bei Erhöhung der Leistung der flexiblen Lasten bzw. bei Reduktion der bereitgestellten Leistung der flexiblen Aufbringungseinheit. Es wird angenommen, dass eine Leistungsreduktion bis hin zur vollständigen Abschaltung der flexiblen Lasten und Aufbringungseinheiten technisch umsetzbar ist.

Die flexiblen Aggregate werden im Block „Modelltransformation“ anhand von fünf Kriterien identifiziert, welche aus dem Stand der Forschung (siehe Kapitel 3) abgeleitet werden.

### **Kriterium 1: Volllaststunden $\geq 5000 \text{ ha}^{-1}$**

Der Stand der Forschung zeigt, dass eine hohe Verfügbarkeit der flexiblen Lasten bzw. Aufbringungseinheiten den Abruf von Flexibilitäten erleichtert. Eine hohe Verfügbarkeit lässt sich anhand der Volllaststunden ableiten. Beispielsweise kann ein Aggregat welches kontinuierlich 8.760 Volllaststunden im Jahr betrieben wird, jederzeit für einen Abruf eingesetzt werden. Im Rahmen von OPTIEVLEX wird angenommen, dass Aggregate die  $\geq 5.000$  Volllaststunden pro Jahr aufweisen zur Flexibilisierung herangezogen werden.

### **Kriterium 2: Verschiebbare Leistung $\geq 5 \text{ kW}_{el}$**

Nach Schloffer et al. [14] wird bei flexiblen Aggregaten eine verschiebbare Leistung von  $\geq 5 \text{ kW}_{el}$  für Niederspannungsnetze und  $\geq 50 \text{ kW}_{el}$  für Mittelspannungsnetze als Kriterium hervorgehoben. In OPTIEVLEX werden Aggregate mit einer Leistung  $\geq 5 \text{ kW}_{el}$  für eine Flexibilisierung in Betracht gezogen.

### **Kriterium 3: Verfügbarkeit $\geq 15 \text{ min}$**

In Schloffer et al. [14] wird zudem eine Verfügbarkeit von mehr als 15 Minuten als essentiell erachtet, um für den Abruf von netz- und systemdienlicher Flexibilität in Betracht gezogen zu werden. Daher müssen flexible Aggregate, die in OPTIEVLEX integriert werden, eine Verfügbarkeit von  $\geq 15 \text{ min}$  aufweisen.

### **Kriterium 4: An- und Abfahrzeiten $\leq 300 \text{ s}$**

Gemäß Schloffer et al. [14] und Schäfer et al. [11] ist vor allem die Bereitstellung von Sekundär- und Tertiärregelleistung bei einem systemdienlichen Einsatz der Flexibilitäten umsetzbar. Da in Österreich die Aktivierung der Sekundärregelreserve innerhalb von maximal 5 min erfolgen muss, wird im Rahmen von OPTIEVLEX angenommen, dass flexible Aggregate eine An- bzw. Abfahrzeit von 300 s nicht überschreiten dürfen. [108]

Zur Identifikation der flexiblen Aggregate in OPTIEVLEX, werden die Kriterien in Tabelle 5-6 zusammengeführt. Die zur Flexibilisierung geeigneten Aggregate und deren Kriterien stammen aus Schäfer et al. [11, 92], da hier die Flexibilitätsparameter erstmals anhand von Simulationen und Feldversuchen entwickelt wurden. Details zu den Volllaststunden und Leistungen sind in Tabelle 2-3 ersichtlich, während nähere Informationen zu den Flexibilitätsparametern der Tabelle 10-1 (S.215) entnommen werden können.



Da ARAs mit einer Ausbaukapazität < 10.000 EW (GK1 und GK2) gemäß Stand der Forschung kein bzw. nur ein geringes Flexibilitätspotential aufweisen (siehe Kapitel 3.2.2.3), werden die Leistungen zum Kriterium 2 für eine minimale Kapazität von 10.000 EW und damit für die GK3 (10.000 EW), GK4 (50.000 EW) und GK5 (100.001 EW) berechnet. Grün hinterlegte Felder zeigen ein erfülltes Kriterium an, während rot hinterlegte Felder auf ein nicht erfülltes Kriterium hinweisen.

**Tabelle 5-6: Kriterien zur Auswahl der in OPTIEVLEX berücksichtigten flexiblen Aggregate**

Zur Flexibilisierung geeignete Aggregate	Kriterium			
	1 Volllaststunden [ha <sup>-1</sup> ]	2 Leistung [kW] GK3/4/5	3 Verfügbarkeit [min]	4 An- und Abfahrzeit [s]
Zulaufpumpwerk	8760	5/19/31	5 – 15	60/60
Sandfanggebläse	8760	5/6/6	5 – 60	60/60
Belüftung	8760	23/89/158	5 – 60 <sup>1</sup> /120 <sup>2</sup>	60/60
Umwälzung	8760	10/23/25	15 – 30	60/60
Rezirkulation	8760	5/8/14	5 – 720	60/60
Rücklaufschlammpumpe	8760	5/15/25	5 – 120	60/60
Rührwerke ( <i>Faulturm</i> )	8760	1/2/3	15 – 30	180/60
Schlammumpen ( <i>Faulturm</i> )	8760	0/2/2	15 – 1.440	120/60
Eindicker	4380	0/1/0	120 – 1.440	60/900
Entwässerung	2920	3/9/18	150 – 420	>120/>120
BHKW	8760	35/90/337	5 - 1.440	180/300

1 Anlagen mit anaerober Schlammstabilisierung

2 Anlagen mit aerober Schlammstabilisierung

Die Aggregate Zulaufpumpwerk, Sandfanggebläse, Belüftung, Umwälzung, Rezirkulation und Rücklaufschlammpumpe erfüllen alle Kriterien und werden in OPTIEVLEX als flexible Aggregate definiert. Da gemäß Schäfer et al. [11, 92] eine gleichzeitige Abschaltung der Belüftung und Umwälzung im Belebungsbecken aufgrund möglicher negativer Effekte auf die Reinigungsleistung nicht empfohlen wird, wird nur eins der zwei Aggregate zur Flexibilisierung herangezogen. Die Belüftung weist eine höhere flexible Leistung, sowie eine höhere Abschaltdauer auf, womit diese in der Modellierung Berücksichtigung findet. Die Aggregate der Schlammbehandlung erfüllen die Kriterien nicht und werden nicht als flexible Aggregate definiert. Bei den Aggregaten Eindicker und Entwässerung können externe Eingriffe in den Prozess zudem zu technischen Problemen, wie z.B. Anbackungen führen, was einen weiteren Grund darstellt keine Flexibilisierung vorzunehmen. [92] Es wird angenommen, dass dies auf das Aggregat Trockner übertragbar ist, welches deshalb in OPTIEVLEX nicht flexibilisiert wird.

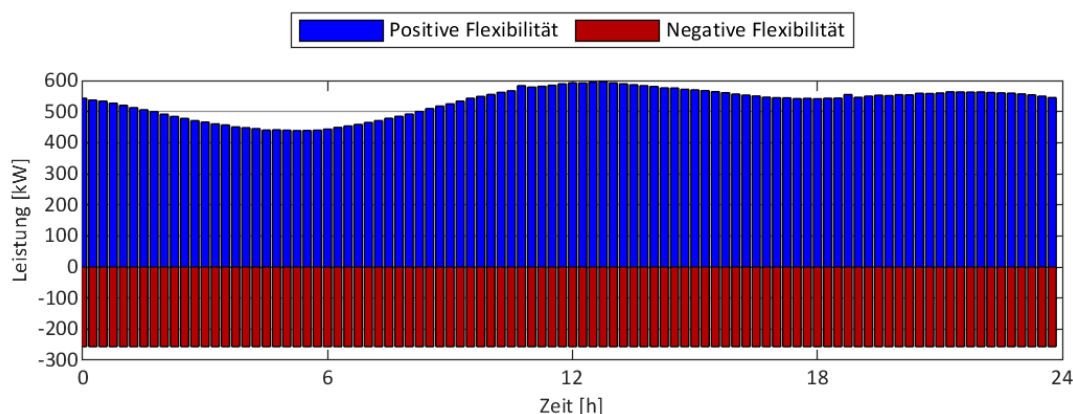
Hinsichtlich der Aufbringungseinheiten gilt zu beachten, dass die in Tabelle 5-6 aufgezeigten Kriterien für ein BHKW ermittelt wurden [92]. Es wird angenommen, dass die Parameter auf die weiteren Verwertungsoptionen mit elektrischem Output in OPTIEVLEX (MGT und ORC) übertragbar sind. Um Flexibilität mittels Aufbringungseinheiten bereitstellen zu können, ist das Vorliegen von Speicherkapazitäten essenziell, was zur Einführung des Kriteriums 5 führt.

### **Kriterium 5: Speicherkapazität > 0**

Gemäß Kapitel 3 und 4 zeigen hohe elektrische und thermische Energieautarkiegrade die Verfügbarkeit von dezentralen (ARA-internen) Energieaufbringungseinheiten an, welche in der Regel mit Flexibilitätspotentialen verbunden sind. Eine dezentrale Aufbringung impliziert zudem das Vorliegen von Speicherkapazitäten, die eine Flexibilisierung überhaupt erst ermöglichen. In OPTIEVLEX ist daher bei einer gewünschten Flexibilisierung von Aufbringungseinheiten eine Speicherkapazität > 0 anzunehmen.

#### *5.6.5.3 Blockergebnisse*

Der Block „Modelltransformation“ liefert ein elektrisches bzw. thermisches Jahreslastprofil je Last und ein elektrisches bzw. thermisches Jahresaufbringungsprofil je Aufbringungseinheit. Die darauf basierenden positiven und negativen theoretischen Flexibilitätspotentiale werden in Form eines Flexibilitätsbandes dargestellt. Dabei werden die flexiblen Leistungen der in OPTIEVLEX flexibilisierten Aggregate gemäß Kapitel 5.6.5.2 kumuliert. Das Flexibilitätsband zeigt das theoretische positive und negative Flexibilitätspotential je Zeitschritt und ermöglicht die Illustration des Tagesverlaufs. Abbildung 5-30 zeigt ein exemplarisches Flexibilitätsband für einen Energieverbund der GK5 (100.001 EW). Es gilt zu beachten, dass in dieser Darstellungsform die Flexibilitätsparameter (siehe Tabelle 10-1, S.215), Speicherkapazitäten und Bedarfsprofile an netz-, sowie systemdienlicher Flexibilität keine Berücksichtigung finden. Das realisierbare Flexibilitätspotential ist geringer anzusetzen und kann auf Basis des theoretischen Potentials unter Einbezug der Flexibilitätsparameter und Speicherkapazitäten, sowie des netz- und systemdienlichen Flexibilitätsbedarfs ermittelt werden (siehe Kapitel 5.7).



**Abbildung 5-30: Exemplarisches Flexibilitätsband für einen Energieverbund der GK 5 (100.001 EW)**

## 5.7 Schritte 4 und 5: Erstellung des Steady-State-Teilmodells 2

In Schritt 4 und 5 wird das MATLAB-Steady-State-Simulationsmodell erweitert, um Szenario-basierte Simulationen des netz- und systemdienlichen Flexibilitätseinsatzes zu ermöglichen. Die Modellerweiterung verbindet zeitlich aufgelöste Jahresbedarfsprofile für netz- und systemdienliche Flexibilität mit den zeitlich aufgelösten theoretischen Flexibilitätspotentialen des Energieverbundes, die mittels dem Steady-State-Teilmodell 1 ermittelt werden. Dabei wird unter Berücksichtigung der Flexibilitätsparameter der flexiblen Aggregate (siehe Tabelle 10-1, S.215) und der Speicherkapazitäten für die Energieträger Faulgas, Klärschlamm und Produktgas das zeitlich aufgelöste realisierbare Flexibilitätspotential je Szenario berechnet. Die netz- und systemdienlichen Szenarien (siehe Abbildung 5-36) werden im Rahmen der Modellierungsschritte 4 und 5 definiert und ermöglichen die Analyse des Einsatzes von unterschiedlichen Kombinationen aus flexiblen Aggregaten zur Bereitstellung von netz- und systemdienlicher Flexibilität.

Die nachfolgenden Unterkapitel beschreiben die Systemgrenzen des Steady-State-Teilmodells 2, sowie dessen Aufbau. Der Überblick zum Aufbau und Simulationsablauf in Kapitel 5.7.2 dient der Einordnung der Modellblöcke, welche in den Kapiteln 5.7.3 und 5.7.4 genauer dargestellt werden. Die Modellblöcke werden hinsichtlich der möglichen Nutzerspezifikationen, dem theoretischen Hintergrund und den damit ermittelbaren Ergebnissen betrachtet.

### 5.7.1 Systemgrenzen

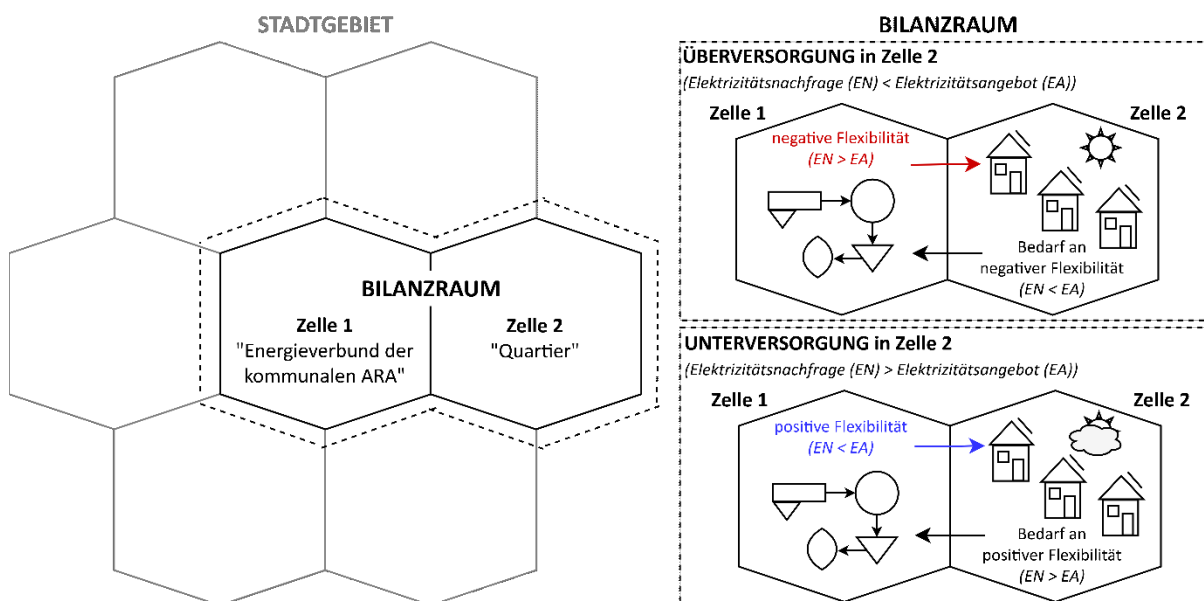
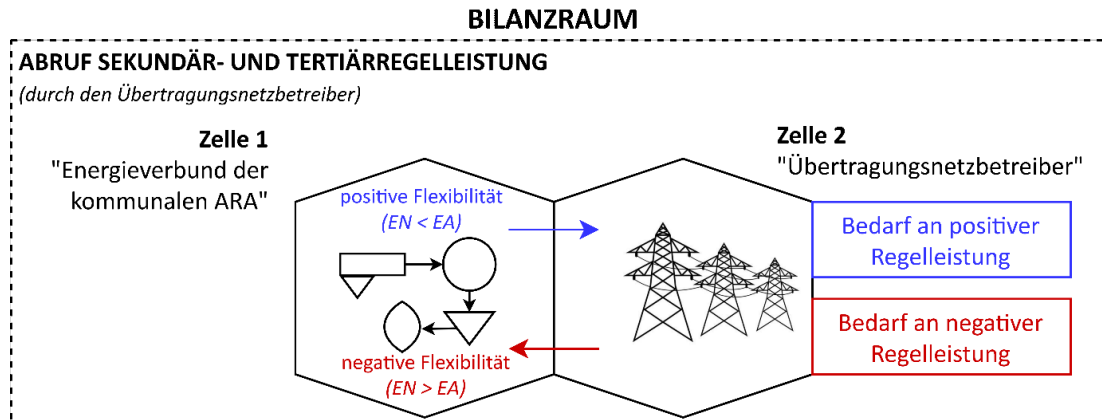


Abbildung 5-31: Systemgrenzen für die netzdienlichen Szenarien im Steady-State-Teilmodell 2

Im Rahmen der netzdienlichen Szenarien wird zur Ermittlung des zeitlich aufgelösten realisierbaren Flexibilitätspotentials, neben den Flexibilitätsparametern und Speicherkapazitäten des Energieverbundes einer kommunalen ARA, das Jahresbedarfsprofil an netzdienlicher Flexibilität eines Stadtgebietes, hier „Quartier“ genannt, berücksichtigt. Die Systemgrenze umfasst daher gemäß Abbildung 5-31 zwei Zellen. Zelle 1 repräsentiert das System „Energieverbund“ gemäß Abbildung 5-1 (siehe Kapitel 5.4.1). Und Zelle 2 bildet die Residuallast gemäß Formel (3-1) eines „Quartiers“ ab, welche den netzdienlichen Flexibilitätsbedarf widerspiegelt. Zelle 1 und 2 stellen somit eine lokale oder regionale Erneuerbare-Energiegemeinschaft (EEG) gemäß dem Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz [5] dar, in welcher der Energieverbund als netzdienlicher Flexibilitätsdienstleister dient, um den Ausgleich von Elektrizitätsangebot und -nachfrage zu optimieren. Liegt z.B. in Zelle 2 eine Überversorgung an Elektrizität durch erhöhte PV-Einspeisung vor (Nachfrage < Angebot), stellt die Zelle 1 negative Flexibilität bereit. Dazu erfolgt eine Erhöhung der Nachfrage und/oder eine Reduktion des Angebots in Zelle 1 (Nachfrage > Angebot). Bei einer Unterversorgung im Bilanzraum (Nachfrage > Angebot), z.B. weil nur eine geringe PV-Einspeisung in Zelle 2 vorliegt, stellt die Zelle 1 positive Flexibilität bereit. Dazu wird eine Reduktion der Nachfrage und/oder eine Erhöhung des Angebots in Zelle 1 vorgenommen (Nachfrage < Angebot). Details zum netzdienlichen Jahresbedarfsprofil sind in Kapitel 5.7.3.2 ersichtlich.



**Abbildung 5-32: Systemgrenzen für die systemdienlichen Szenarien im Steady-State-Teilmodell 2**

Im Rahmen der systemdienlichen Szenarien wird das zeitlich aufgelöste realisierbare Flexibilitätspotential unter Berücksichtigung der Flexibilitätsparameter und Speicherkapazitäten, sowie des Jahresbedarfsprofils an systemdienlicher Flexibilität ermittelt. Auch hier umfasst die Systemgrenze gemäß Abbildung 5-32 zwei Zellen. Zelle 1 wird analog zu den netzdienlichen Szenarien definiert. Zelle 2 bildet ein Regelleistungsbedarfsprofil mit zugehörigen Leistungs- und Arbeitspreisen ab, welches den systemdienlichen Flexibilitätsbedarf widerspiegelt. Zelle 1 dient innerhalb des Bilanzraums als systemdienlicher Flexibilitätsdienstleister und stellt positive und negative Regelleistung gegen Vergütung bereit. Details zum systemdienlichen Jahresbedarfsprofil sind in Kapitel 5.7.3.2 ersichtlich.

## 5.7.2 Überblick zum Aufbau des Steady-State-Teilmodells 2

Abbildung 5-33 zeigt den Aufbau und das Ablaufschema des Steady-State-Teilmodells 2. Das Modell basiert auf zwei Simulationsblöcken, welche über Datenschleifen miteinander und mit dem Teilmodell 1 in Verbindung stehen. Die Zahlen bei den Datenschleifen stellen den Simulationsablauf dar, welcher der Ermittlung des zeitlich aufgelösten realisierbaren Flexibilitätspotentials anhand von netz- und systemdienlichen Szenarien dient.

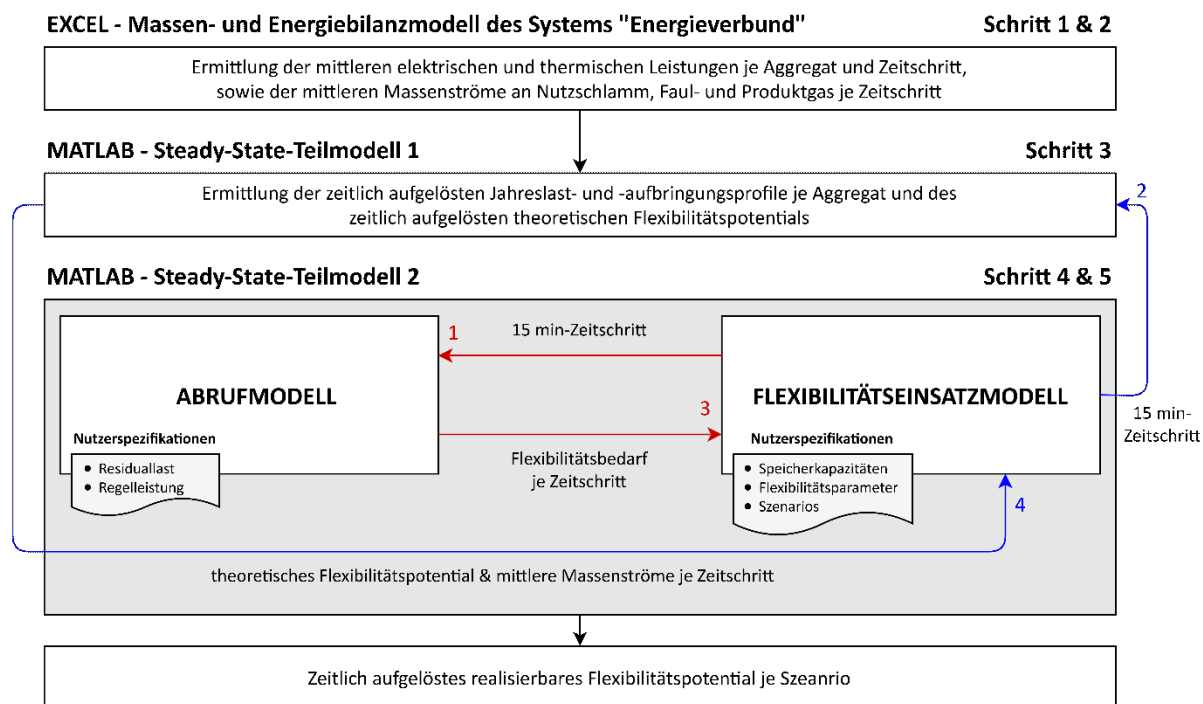


Abbildung 5-33: Aufbau und Ablaufschema zum Steady-State-Teilmodell 2

Das Steady-State-Teilmodell 2 beinhaltet gemäß Abbildung 5-33 die Blöcke „Abrufmodell“ und „Flexibilitätseinsatzmodell“. Die den einzelnen Blöcken zugeordneten nutzerspezifisch definierbaren Inputparameter (siehe Kapiteln 5.7.3 und 5.7.4) dienen in den jeweiligen Blöcken als Datengrundlage für weitere Simulationsschritte. Nach Eingabe der Nutzerspezifikationen erfolgt der Simulationsstart. Da für weiterführende Untersuchungen im Bereich der Stromnetzanalytik eine möglichst hohe zeitliche Auflösung anzustreben ist, wird die in OPTIEVLEX höchstmögliche zeitliche Auflösung von 15 min-Zeitschritten in **Schritt 1 und 2** über den Block „Flexibilitätseinsatzmodell“ an den Block „Abrufmodell“ und das Steady-State-Teilmodell 1 übergeben. Der **Block „Abrufmodell“** dient der Ermittlung des Flexibilitätsbedarfs je Zeitschritt, welcher in **Schritt 3** vom **Block „Flexibilitätseinsatzmodell“** abgerufen wird. Zudem werden in **Schritt 4** das theoretische Flexibilitätspotential je flexiblem Aggregat und 15 min-Zeitschritt, sowie die mittleren Massenströme je Zeitschritt (Zulauf, Faulgas, Klärschlamm, Asche und Produktgas) aus dem Steady-State-Teilmodell 1 abgerufen. Im **Block „Flexibilitätseinsatzmodell“** wird in weiterer Folge das realisierbare Flexibilitätspotential je Szenario ermittelt. Das realisierbare Flexibilitätspotential basiert auf

dem theoretischen Flexibilitätspotential, bezieht jedoch die Flexibilitätsparameter der flexiblen Aggregate, die Speicherkapazitäten für Faulgas, Klärschlamm und Produktgas, sowie den Flexibilitätsbedarf gemäß dem Block „Abrufmodell“ mit ein. Das realisierbare Flexibilitätspotential je Zeitschritt und Szenario dient als Basis für die Berechnung der in Kapitel 5.2 beschriebenen Kennzahlen, sowie der Erstellung der veränderten Jahreslast- und -aufbringungsprofile der flexiblen Aggregate und des Systems „Energieverbund“.

### **5.7.3 Block „Abrufmodell“**

Der Block „Abrufmodell“ dient der Integration von anlagenspezifischen Jahresbedarfsprofilen an netz- und systemdienlicher Flexibilität.

#### *5.7.3.1 Nutzerspezifikationen*

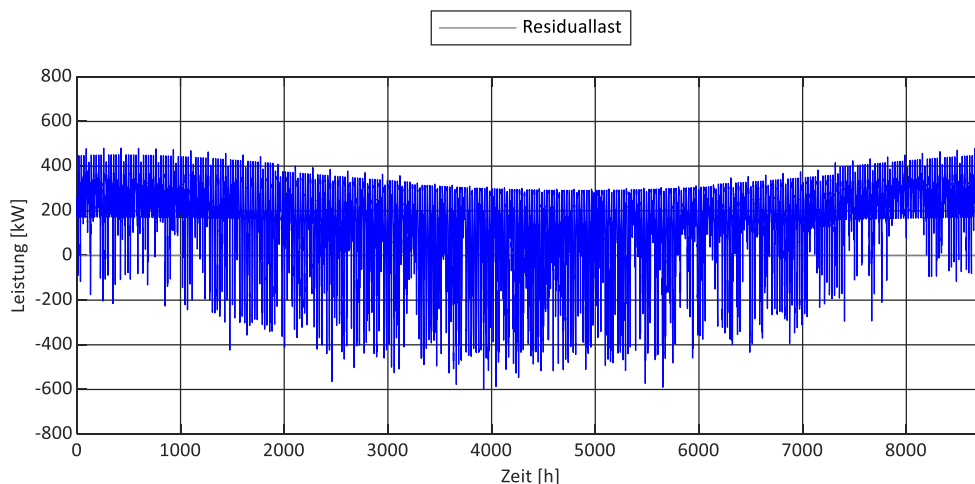
Die Nutzerspezifikationen ermöglichen die Einbindung ARA-spezifischer Jahresbedarfsprofile lokaler Residuallasten (netzdienlich) bzw. abgerufener Sekundär- und Tertiärregelleistung (systemdienlich) über EXCEL-Tabellen. Diese müssen den Bedarf an flexibler Leistung je Zeitschritt beinhalten. Um monetäre Effekte von Regelleistungsabrufen untersuchen zu können sind bei systemdienlichen Szenarien zudem die den jeweiligen Zeitschritten zugehörigen Arbeits- und Leistungspreise in den EXCEL-Tabellen zu integrieren.

#### *5.7.3.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – Theoretischer Hintergrund*

Bei fehlenden anlagenspezifischen Jahresbedarfsprofilen können in OPTIEVLEX hinterlegte Jahresbedarfsprofile an netz- und systemdienlicher Flexibilität für die Ermittlung des realisierbaren Flexibilitätspotentials herangezogen werden.

#### JAHRESBEDARFSPROFIL AN NETZDIENLICHER FLEXIBILITÄT

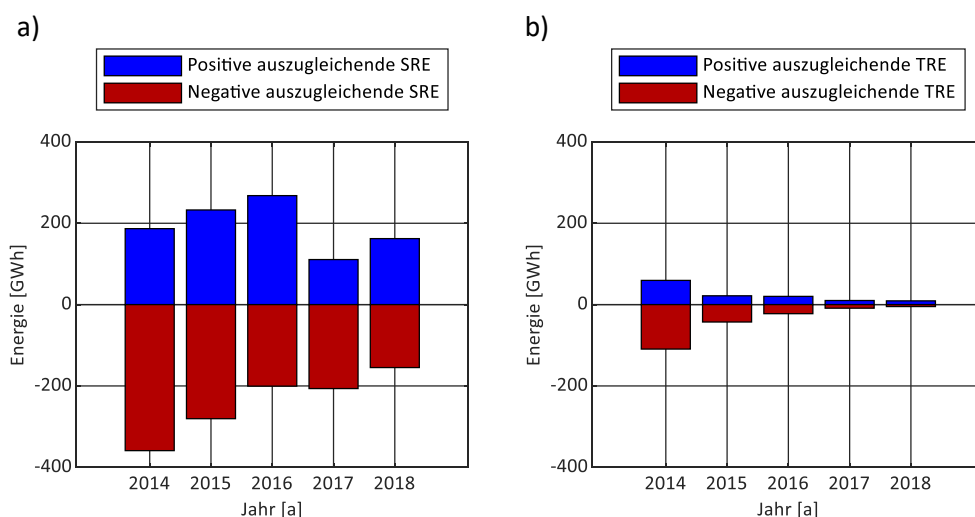
Für die netzdienlichen Szenarien gemäß Abbildung 5-36 sind in OPTIEVLEX Residuallasten nach Formel (3-1) hinterlegt. Das Residuallastprofil bildet ein Quartier einer mittelgroßen Stadt mit 900 durchschnittlichen 3-Personen-Haushalten (Jahresverbrauch =  $2.600 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  [134]) im Jahr 2030 mit erhöhter Ausnutzung vorhandener Photovoltaik-Potentiale (PV) ab. Für die Betrachtungen in OPTIEVLEX wird eine Potentialausnutzung von 25 % angenommen. Dies ist auf die Ziele des Regierungsprogrammes 2020-2024 [4] und des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes [5] zurückzuführen, da die angestrebte PV-Erzeugungskapazität von  $12 \text{ TWh}_{\text{el}}$  ca. 24 % des theoretischen Potentials (ca.  $50 \text{ TWh}_{\text{el}}$  [136]) entspricht. Hier gilt zu erwähnen, dass die Daten zum Potential des Quartiers, sowie zum theoretischen Potential auf der Annahme basieren, dass Dachflächen zu 100 % für PV-Anlagen genutzt werden. Die jährliche Residuallast des Wohngebietes mit positiven und negativen Spitzen von rund  $480 \text{ kW}_{\text{el}}$  bis  $-600 \text{ kW}_{\text{el}}$  ist in Abbildung 5-34 dargestellt. Die jährliche positive bzw. negative auszugleichende Energiemenge beträgt rund  $1.600 \text{ MWh}_{\text{el}}$  bzw. ungefähr  $-300 \text{ MWh}_{\text{el}}$ .



**Abbildung 5-34: Jahresbedarfsprofil an netzdienlicher elektrischer Flexibilität in OPTIEVLEX – Elektrisches Residuallastprofil eines Quartiers einer mittelgroßen Stadt mit 900 durchschnittlichen 3-Personen-Haushalten im Jahr 2030 mit 25%iger Ausnutzung des theoretischen Photovoltaik-Potentials**

JAHRESBEDARFSPROFIL AN SYSTEMDIENLICHER FLEXIBILITÄT

Für die systemdienlichen Szenarien nach Abbildung 5-36 sind in OPTIEVLEX Jahresbedarfsprofile der Sekundär- und Tertiärregelleistung hinterlegt. Diese beinhalten 15 min-Werte der für die Regelzone APG abgerufenen Sekundär- und Tertiärregelleistungen von AT-Anbietern der Jahre 2014-2018 [109]. Die in den jeweiligen Jahren auszugleichende positive und negative elektrische Energiemenge ist in Abbildung 5-35 ersichtlich. Zudem sind jedem 15 min-Wert zugeordnete Leistungs- und Arbeitspreise hinterlegt (siehe Kapitel 5.2), welche der Ermittlung von Erlösen aus der Bereitstellung systemdienlicher Flexibilität dienen.



**Abbildung 5-35: Positive und negative für die Regelzone APG abgerufene elektrische a) Sekundär- und b) Tertiärregelenergiemenge von AT-Anbietern der Jahre 2014-2018 – eigene Darstellung nach [109]**

Die Analyse auf der Basis von fünf zeitlich zurückliegenden Jahren sichert dabei die Ermittlung repräsentativer Ergebnisse hinsichtlich einer möglichen Erlösgenerierung, da Abruf- und Preisschwankungen Berücksichtigung finden.

### 5.7.3.3 Blockergebnisse

Der Block „Abrufmodell“ dient der Ermittlung des netz- und/oder systemdienlichen elektrischen Flexibilitätsbedarfs je Zeitschritt, welcher an den Block „Flexibilitätseinsatzmodell“ übergeben wird (siehe Abbildung 5-33).

## 5.7.4 Block „Flexibilitätseinsatzmodell“

Der Block „Flexibilitätseinsatzmodell“ stellt das Kernelement des Steady-State-Teilmodells 2 dar und verknüpft das Steady-State-Teilmodell 1 mit dem Teilmodell 2. Er dient der Ermittlung zeitlich aufgelöster realisierbarer elektrischer Flexibilitätspotentiale im Rahmen von netz- und systemdienlichen Szenarien. Die Rahmenbedingungen zu den Szenarien werden im Block „Flexibilitätseinsatzmodell“ definiert.

### 5.7.4.1 Nutzerspezifikationen

Im Rahmen der Nutzerspezifikationen können anlagenspezifische Jahresbedarfsprofile der netz- und systemdienlichen Flexibilität in OPTIEVLEX eingespielt werden. Zudem können die Flexibilitätsparameter der flexiblen Lasten und die erforderlichen Speicherkapazitäten zur Flexibilisierung der Energieaufbringungseinheiten definiert werden.

Um diverse Abschaltgrenzen und Regenerationszeiten der flexiblen Lasten berücksichtigen zu können, erfolgt vor Start der Simulation die Definition der maximalen Abschaltzeiten der für OPTIEVLEX ausgewählten flexiblen Aggregate (siehe Kapitel 5.6.5). Die zugrundeliegenden Flexibilitätsparameter werden Schäfer et al. [11, 92] entnommen (siehe Tabelle 10-1). Dabei wird angenommen, dass die Regenerationszeit jeweils für die maximale Abschaltdauer einzuhalten ist. Daher können bei geringeren Abschaltdauern auch geringere Regenerationszeiten auftreten. Um die Reinigungsleistung nicht nachhaltig negativ zu beeinflussen, wird angenommen, dass die Regenerationszeit zumindest der Abschaltdauer entsprechen muss. Tabelle 5-7 zeigt die Auswahloptionen inkl. der zugehörigen Regenerationszeiten. Hinsichtlich der flexiblen Energieaufbringungseinheiten

**Tabelle 5-7: Auswahloptionen zu den maximalen Abschaltdauern inkl. zugehöriger Regenerationszeiten der flexiblen Lasten in OPTIEVLEX**

Flexible Lasten	Abschaltdauer/Regenerationszeit [min]				
	15/30	30/60	-	-	-
Zulaufpumpwerk	15/30	30/60	-	-	-
Sandfanggebläse	15/15	30/30	45/45	60/60	-
Belüftung	15/15	30/30	45/45	60/60	-
Rezirkulation	15/15	30/30	45/45	60/60	120/120
Rücklaufschlammpumpe	15/15	30/30	45/45	60/60	120/120



Hinsichtlich der erforderlichen Speicherkapazitäten sind die Kapazitäten des Faul- und Produktgasspeichers (in m<sup>3</sup>), sowie des Schlammstapels (in tTS) zu definieren. Die Kapazitäten sind frei wählbar, müssen jedoch gemäß Kriterium 5 > 0 sein (siehe Kapitel 5.6.5). Zudem kann die Nennleistung der Energieaufbringungseinheiten spezifiziert werden. Eine weitere Nutzerspezifikation ermöglicht es in jedem Zeitschritt eine mögliche Leistungserhöhung der elektrischen Energieaufbringungseinheiten mit dem elektrischen Bedarf des Energieverbundes zu begrenzen. Dies bedeutet, dass in keinem Zeitschritt die aufgebrauchte elektrische Leistung die nachgefragte elektrische Leistung übersteigt. Wird in diesem Fall positive Flexibilität bereitgestellt dann erfolgt dies mittels Reduktion der Nachfrage und ohne Bereitstellung überschüssiger Elektrizität (siehe beispielsweise Kapitel 6.3.6.2).

5.7.4.2 Berechnungsansatz in OPTIEVLEX – Theoretischer Hintergrund

	Szenario	Flexible Aufbringungseinheit Faulgasnutzung	Flexible Last (Zulaufpumpwerk, Sandfanggebläse, Belüftung, Rezirkulation, Rücklaufschlammpumpe)	Flexible Aufbringungseinheit Klärschlammnutzung
<b>Netzdienliche Szenarien</b> (Ausgleich von lokalen/regionalen Residuallasten)	<b>Szenario 1</b> Flexibilisierung der Aufbringungseinheit zur Faulgasnutzung (inkl. Gasspeicher)	Flexibilisierung	Keine Flexibilisierung	Keine Flexibilisierung
	<b>Szenario 2</b> Szenario 1 erweitert um den Einsatz flexibler Lasten	Flexibilisierung	Flexibilisierung	Keine Flexibilisierung
	<b>Szenario 3</b> Szenario 1 erweitert um die Flexibilisierung der Aufbringungseinheit zur Klärschlammnutzung (inkl. Gasspeicher)	Flexibilisierung	Keine Flexibilisierung	Flexibilisierung
	<b>Szenario 4</b> Szenario 3 erweitert um den Einsatz flexibler Lasten	Flexibilisierung	Flexibilisierung	Flexibilisierung
	<b>Szenario 5</b> Szenario 1 bei saisonaler Nutzung des Klärschlammes zum Abbau eines Schlammstapels	Flexibilisierung	Keine Flexibilisierung	Saisonale Flexibilisierung
	<b>Szenario 6</b> Szenario 5 erweitert um den Einsatz flexibler Lasten	Flexibilisierung	Flexibilisierung	Saisonale Flexibilisierung
<b>Systemdienliche Szenarien</b> (Bereitstellung von Sekundär- und Tertiärregelleistung)	<b>Szenario 7</b> Flexibilisierung der Aufbringungseinheit zur Faulgasnutzung (inkl. Gasspeicher)	Flexibilisierung	Keine Flexibilisierung	Keine Flexibilisierung
	<b>Szenario 8</b> Szenario 7 erweitert um die Flexibilisierung der Aufbringungseinheit zur Klärschlammnutzung (inkl. Gasspeicher)	Flexibilisierung	Keine Flexibilisierung	Flexibilisierung

Abbildung 5-36: Mit OPTIEVLEX untersuchbare-Szenarien zur netz- und systemdienlichen Flexibilisierung von Energieverbunden kommunaler ARAs

Nach Eingabe der Nutzerspezifikationen wird gemäß dem Simulationsablauf in Abbildung 5-33 das zeitlich aufgelöste realisierbare Flexibilitätspotential anhand von netz- und systemdienlichen Szenarien ermittelt. Die Szenarien sind in Abbildung 5-36 illustriert und bilden diverse Kombinationen der zur Flexibilisierung herangezogenen flexiblen Aggregate ab. Dabei kennzeichnen grün hinterlegte Felder die flexibilisierten Einheiten, während nicht flexibilisierte Einheiten grau hinterlegt sind. Das Referenzszenario dient als Vergleichsszenario und berechnet die Kennzahlen (siehe Kapitel 5.2) für den Ausgangszustand. Im Referenzszenario erfolgt noch keine Flexibilisierung, es wird jedoch die elektrische Leistung der Aufbringungseinheiten im Modul „Faulgasnutzung“ in jedem Zeitschritt an die nachgefragte Leistung bestmöglich angepasst (siehe Abbildung 6-12), da dies dem Stand der Technik entspricht. [11, 12, 21] Die Szenarien 1 – 6 untersuchen diverse Kombinationen aus flexiblen Lasten und Aufbringungseinheiten zur Bereitstellung netzdienlicher Flexibilität. Da vor allem eine Stapelung des Schlammes langfristig vorgenommen werden kann, wird in Szenario 5 und 6 eine saisonale Betriebsweise der Aufbringungseinheiten im Modul „Klärschlammnutzung“ analysiert. Um die Eingriffe in den Reinigungsprozess so gering wie möglich zu halten, werden in den Szenarien 1 – 6 vorhandene Flexibilitätspotentiale der Aufbringungseinheiten vor den Potentialen der flexiblen Lasten abgerufen. Die Szenarien 7 und 8 dienen der Untersuchung des systemdienlichen Einsatzes der flexiblen Aufbringung. Flexible Lasten finden zum Schutz der Reinigungsleistung in diesen Szenarien keine Berücksichtigung.

Es gilt zu beachten, dass je nach nutzerspezifisch definierter Konfiguration des Systems „Energieverbund“ (siehe Kapitel 5.4.1) nicht alle Szenarien berechnet werden können. Sind beispielsweise keine Energieaufbringungseinheiten integriert, werden nur die flexiblen Lasten zur Flexibilisierung herangezogen. Die Annahmen und Modellierungsgrundlagen zum Flexibilitätseinsatz der flexiblen Aggregate werden nachfolgend erläutert. Hier gilt vorab zu verdeutlichen, dass die Steuerung der flexiblen Aggregate keiner Zielfunktion folgt, sondern auf definierten Regeln basiert. Das Regelwerk berücksichtigt die Kriterien nach Kapitel 5.6.5, die Flexibilitätsparameter der flexiblen Aggregate, die Speicherkapazitäten für Faulgas, Klärschlamm und Produktgas, sowie das Flexibilitätspotential begrenzte Rahmenbedingungen. Details dazu werden nachfolgend erläutert.

### FLEXIBILITÄTSEINSATZ DER FLEXIBLEN LASTEN

Bei der Einsatzmodellierung der flexiblen Lasten finden neben den Flexibilitätsparametern, die Kriterien 1 und 2 nach Kapitel 5.6.5 Berücksichtigung. Weisen die Aggregate weniger als 5.000 Volllaststunden oder eine Leistung  $< 5 \text{ kW}_{el}$  auf, werden sie nicht zur Bereitstellung von Flexibilität herangezogen, da die verfügbaren flexiblen Leistungen bzw. Energiemengen einen möglichen negativen Effekt auf die Reinigungsleistung nicht rechtfertigen.

Da Spitzen mit erhöhtem Zufluss oder Regenwetterfälle Hochlastphasen für kommunale ARAs darstellen, kann eine Flexibilisierung zu diesen Zeiten den Reinigungsprozess negativ beeinflussen. Flexible Lasten wie das Zulaufpumpwerk und der Sandfang sind beispielsweise besonders belastet und können in diesen Phasen nicht bzw. nur begrenzt Flexibilitäten bereitstellen. Details zum Ausmaß der Beeinflussung diverserer Aggregate bei Regenwetter sind der Tabelle 10-2 (S.216) zu entnehmen. [92] Um dies auch in der Simulation berücksichtigen zu können wird bei einem Zulaufmassenstrom, der über dem maximalen Trockenwetterzulauf liegt, keine Flexibilisierung der flexiblen Lasten vorgenommen.

Um die Eingriffe in den Reinigungsprozess so gering wie möglich zu halten, werden die flexiblen Lasten beginnend mit der Last mit dem höchsten theoretischen Flexibilitätpotential der Reihe nach gesteuert. Dafür wird für jeden 15 min-Zeitschritt basierend auf dem Flexibilitätsbedarf, der Flexibilitätsparameter und der vorab genannten Kriterien überprüft, ob Lastreduktionen bei den flexiblen Lasten möglich sind. Sind diese durchführbar wird der Flexibilitätsbedarf je Zeitschritt um das kumulierte realisierbare Flexibilitätpotential der flexiblen Lasten reduziert. Dies ist exemplarisch für die Belebungsbeckenbelüftung in Abbildung 6-16 ersichtlich. Das kumulierte realisierbare Potential kann je Zeitschritt den Flexibilitätsbedarf zwischen 0 % und 100 % decken. Eine Deckung von 0 % liegt beispielsweise vor, wenn eine Überschneidung der Regenerationszeiten auftritt. Ist das kumulierte realisierbare Potential größer als der Flexibilitätsbedarf, werden die Aggregate am Ende der Reihenfolge gar nicht oder nur teilweise flexibilisiert. Bei Abschaltung des Zulaufpumpwerks, der Rezirkulation und der Rücklaufschlammpumpe wird das aufgestaute Abwasser bzw. der gesammelte Schlamm in den Regenerationszeiten abgepumpt. Dies führt zu erhöhten Leistungen in diesen Zeitschritten. Dabei liegt die Annahme zugrunde, dass ausreichend Pufferkapazitäten zur Verfügung stehen. Beim belüfteten Sandfang wird gemäß Schäfer et al. [11] angenommen, dass nach Abschaltung kein erhöhter Leistungsbedarf auftritt. Da bei einer Abschaltung der Belüftung die Sauerstoffkonzentration absinken kann, wird angenommen, dass in den Regenerationszeiten um 20 % erhöhte Leistungen auftreten. Dies ist ein im Rahmen von OPTIEVLEX gewählter Richtwert, der eine erhöhte Sauerstoffzufuhr in den Regenerationszeiten berücksichtigen soll. Gemäß Schäfer et al. [11, 92] kann bei kurzfristigen Abschaltungen < 60 min und einer angepassten Steuerung, welche sich nicht an der Sauerstoffkonzentration orientiert, eine zusätzliche Sauerstoffzufuhr während der Regenerationszeiten sogar teilweise entfallen.

Negative Flexibilität über flexible Lasten ist im Rahmen von OPTIEVLEX nicht verfügbar, da ein abrufbedingtes Hochfahren der Lasten gemäß Literatur [11–14] aus kapazitiven Gründen nur begrenzt möglich ist und ein Leerlauf, z.B. von Pumpen oder Rührwerken, nicht wirtschaftlich ist. Ein Verschieben des Abpumpens von Pufferkapazitäten zu Zeitschritten mit negativer Residuallast wird daher nicht berücksichtigt.

### FLEXIBILITÄTSEINSATZ DER FLEXIBLEN ENERGIEAUFBRINGUNGSEINHEITEN

Das realisierbare Flexibilitätspotential der flexiblen Energieaufbringungseinheiten je 15 min-Zeitschritt wird unter Berücksichtigung des Flexibilitätsbedarfs, der Speicherkapazitäten, der Nennleistungen, sowie der Kriterien 1, 2 und 5 (siehe Kapitel 5.6.5) ermittelt. Dabei findet die Regelstrategie „Greedy“ [137] beim Speicherabruf Anwendung. Liegt ein Bedarf an negativer Flexibilität im Bilanzraum vor (Übersorgung), werden die Aufbringungseinheiten je nach Höhe des negativen Flexibilitätsbedarfes teilweise oder gänzlich heruntergefahren. Das nicht genutzte Faul- bzw. Produktgas wird einem Gasspeicher zugeführt. Bei vollgeladenem Gasspeicher erfolgt keine Leistungsreduktion oder Abschaltung, da eine Abfacklung des Gases aufgrund des Energieverlustes nicht durchgeführt wird. Im Gegensatz dazu wird bei einem positiven Flexibilitätsbedarf im Bilanzraum (Unterversorgung) die Aufbringungseinheit bis hin zur maximalen Nennleistung hochgefahren. Dafür wird Gas aus dem Speicher entnommen. Ist der Gasspeicher vollständig entladen, kann die Leistung nicht erhöht werden. Dies ist exemplarisch in Abbildung 6-15 oder Abbildung 6-20 ersichtlich. Hier gilt zu beachten, dass die Annahme zugrunde liegt, dass eine Leistungsreduktion bis hin zur Abschaltung und ein Hochfahren bis hin zur maximalen Nennleistung technisch jederzeit realisierbar ist. Wirkungsgradverluste im Teillastbetrieb werden in OPTIEVLEX gemäß Höfner [138] berücksichtigt.

Szenario 5 und 6 bildet eine saisonale Klärschlammnutzung ab. Dies ist vor allem für Anlagen relevant deren kontinuierlicher Nutzschlammstrom  $\dot{m}_{TS,NS}$  unter dem je nach Verwertungskonzept erforderlichem Durchsatz liegen. Um eine saisonale Nutzung zu ermöglichen wird der Schlamm in einem Schlammstapel zwischengespeichert. In OPTIEVLEX ist die Saison, Frühling, Sommer, Herbst oder Winter, auszuwählen, in welcher die Verwertung vorgenommen wird. Die Flexibilisierung der flexiblen Aufbringungseinheit erfolgt in der ausgewählten Saison. Die Modellierung des Flexibilitätseinsatzes folgt dabei der vorab erläuterten Methodik. Gemäß Vetter et al. [69] kommt es auch bei langfristiger Lagerung des Klärschlammes zu keiner Veränderung des Glühverlustes, womit ein konstant bleibender Energieinhalt des Nutzschlammes in Szenario 5 und 6 angenommen wird.

5.7.4.3 Blockergebnisse

Im Block „Flexibilitätseinsatzmodell“ erfolgt die Ermittlung der in Kapitel 5.2 eingeführten Kennzahlen je Szenario. Zudem erfolgt die Erstellung der Last- und -aufbringungsprofile des Energieverbundes je Szenario. Um zu analysieren, inwieweit die Last- und -aufbringungsprofile der flexiblen Aggregate Veränderungen aufweisen, sind Auslastungsprofile je Szenario und Aggregat verfügbar. Diese bilden die Auslastung im Vergleich zum Referenzszenario ab. Zudem werden für jedes Aggregat je Szenario die negative und positive bereitgestellte Energiemenge, die Anzahl an Eingriffen in den Betrieb, sowie die Anzahl an Eingriffen die zu einer vollkommenen Deckung der Residuallast beigetragen ermittelt.

## 5.8 Validierung von OPTIEVLEX

Tabelle 5-8: Übersicht zu den Validierungsschritten für OPTIEVLEX

Modellierungsschritt		Datenbasis zur Validierung	Relative Abweichung < 10 %
1	Massenbilanz (MB) System „kommunale ARA“		
1	Energiebilanz (EB) System „kommunale ARA“		
2	MB Modul „Faulgasnutzung“		
2	EB Modul „Faulgasnutzung“	BHKW	
		MGT	
		HK	
2	MB Modul „Trockner“		
2	EB Modul „Trockner“		
2	MB Modul „Klärschlammnutzung“	Verbrennung (VB)	
		Vergasung (VG)	
2	EB Modul „Klärschlammnutzung“	VB	
		VB-ORC	
		VG-BHKW	
		VG-HK	
		VG-HK-ORC	
3	Zeitlich aufgelöst: Jahreslast- und -aufbringungsprofil und theoretisches Flexibilitätspotential (Flexibilitätsband)		
4	Zeitlich aufgelöst: Realisierbares Flexibilitätspotential in netzdienlichen Szenarien		
5	Zeitlich aufgelöst: Realisierbares Flexibilitätspotential in systemdienlichen Szenarien		

Die gesamtsystemische Analyse von Energieverbunden kommunaler ARAs und deren zeitlich aufgelösten theoretischen und realisierbaren Flexibilitätspotentialen, sowie des netz- und systemdienlichen Einsatzes der Potentiale, steht im Fokus der vorliegenden Dissertation. Die Modellierung stellt eine Annäherung an reale Gegebenheiten dar und ist aufgrund der Systemkomplexität mit Unsicherheiten bzw. Abweichungen verbunden. Um Unsicherheiten bzw. Abweichungen quantifizieren zu können, erfolgt im Zuge der Modellentwicklung die Validierung der Modellierungsschritte gemäß Tabelle 5-8.

Bei Verfügbarkeit dienen Realdaten als Basis für den Validierungsprozess. Mit Realdaten validierte Modellierungsschritte sind durch eine grün hinterlegte Datenbasis gekennzeichnet. Bei fehlender Verfügbarkeit wird zur Validierung auf Literaturdaten zurückgegriffen (orange hinterlegt). Da die Resultate diverser Modellschritte über den aktuellen Stand der Technik und Forschung hinausgehen stehen weder Real- noch Literaturdaten zur Validierung zur Verfügung. Kann aus diesem Grund keine Validierung vorgenommen werden sind die Schritte blau hinterlegt. Im Falle des Schritts 3 ist dies vor allem auf Lücken bei den Inputdaten zurückzuführen. Trotz Verfügbarkeit eines realen Lastprofils inklusive zugehörigen Flexibilitätsbandes ist eine Validierung aufgrund fehlender zeitlich aufgelöster Regen- und Zulaufdaten nicht repräsentativ durchführbar. Im Falle der Schritte 4 und 5 entfällt die Validierung der zeitlich aufgelösten realisierbaren Flexibilitätspotentiale hauptsächlich aufgrund fehlender zeitlich aufgelöster Vergleichsdaten. Zudem können die in der Literatur verfügbaren realisierbaren Flexibilitätspotentiale nicht zur Detailvalidierung herangezogen werden, da diese nicht zeitlich aufgelöst sind und die zugrundeliegenden Inputdaten, wie Zuflussmassenströme, Last- und Aufbringungsprofile oder lokale Residuallasten nicht öffentlich zugänglich sind. Die Erhebung repräsentativer Daten und die Validierung dieser Modellierungsschritte stellen inklusive einer möglichen Anpassung der Modellierung eine mögliche zukünftige Forschungstätigkeit dar.

Die Realdaten zur Validierung der Modellierungsschritte 1 und 2 beinhalten Daten die für die vorliegende Dissertation, unter Voraussetzung der Geheimhaltung des Standortes, sowie der detaillierten Schlammengen und Energieverbräuche, bereitgestellt werden. Daher wird hinsichtlich der Validierungsergebnisse auf die Darstellung von spezifischen Verbräuchen und relativen Abweichungen zurückgegriffen. Diese Vorgehensweise bietet zudem den Vorteil, dass Anlagen mit unterschiedlichen Größenklassen verglichen werden können. Die relativen Abweichungen werden gemäß Formel (5-46) berechnet.

$$\text{relative Abweichung} = \frac{(\text{Simulationsergebnis} - \text{Realwert})}{\text{Realwert}} \quad (5-46)$$

Liegt die relative Abweichung unter 10 % wird dies in Tabelle 5-8 mit grün hinterlegten Feldern gekennzeichnet. Höhere bzw. nicht vorhandene Werte sind mit blau hinterlegten Feldern verbunden. Relative Abweichungen < 10 % werden für die systemischen Analysen im Rahmen der vorliegenden Dissertation als ausreichende Annäherung an reale Anlagen akzeptiert. Bei Werten > 10 % sind Änderungen zur Reduktion von Abweichungen vorzunehmen. Liegen keine Werte vor, ist eine Ermittlung dieser im Rahmen von zukünftigen Forschungstätigkeiten anzudenken. Die Validierungsergebnisse werden in den nachfolgenden Unterkapiteln detailliert erläutert.

### 5.8.1 Validierung Schritt 1: Stationäre Massen- und Energiebilanzierung des Systems „kommunale ARA“

*Tabelle 5-9: Charakteristika der zur Validierung der stationären Massen- und Energiebilanzierung des Systems „kommunale ARA“ herangezogenen Kläranlagen ARA 1 – 7*

<b>Ausbaukapazität und Schlammstabilisierungsverfahren</b>	<b>ARA 1</b>	<b>ARA 2</b>	<b>ARA 3</b>	<b>ARA 4</b>	<b>ARA 5</b>	<b>ARA 6</b>	<b>ARA 7</b>
Ausbaukapazität [EW]	6.300	10.478	12.000	18.150	45.000	39.685	113.000
Größenklasse nach EW	3	4	4	4	4	4	5
Schlammstabilisierung	aerob	aerob	anaerob	anaerob	anaerob	anaerob	anaerob
<b>Module</b>	<b>ARA 1</b>	<b>ARA 2</b>	<b>ARA 3</b>	<b>ARA 4</b>	<b>ARA 5</b>	<b>ARA 6</b>	<b>ARA 7</b>
Zulaufpumpwerk	x	x			x	x	x
Rechenanlage	x	x	x	x	x	x	x
Rechengutwaschanlage	x		x	x	x	x	
Sand- und Fettfang	x	x	x	x	x	x	x
Sandwaschanlage			x	x	x	x	x
Vorklärbecken			x	x	x	x	x
Belebungsbecken	x	x	x	x	x	x	x
inkl. RZP		x	x		x	x	x
inkl. RLS	x		x	x	x	x	x
Phosphorelimination	x	x	x	x	x	x	x
Nachklärbecken	x	x	x	x	x	x	x
Voreindicker		x		x		x	
Faulturm			x	x	x	x	x
Eindicker				x	x		
Entwässerung	x	x	x		x	x	x
Trockner					x		
Faulgasnutzung			x	x		x	x
Zusätzliche Aggregate	x	x	x		x	x	x

Die Validierung erfolgt auf Basis der Realdaten von sieben kommunalen ARAs im deutschsprachigen Raum. Alle Anlagen nutzen das Belebtschlammverfahren und weisen unterschiedliche Stabilisierungsverfahren, Anlagenkonfigurationen sowie Größenklassen auf. Tabelle 5-9 zeigt die Ausbaupkapazität, die Art der Schlammstabilisierung, sowie die in der jeweiligen ARA beinhalteten Module.

Zur Validierung erfolgt in OPTIEVLEX die Auswahl der in der jeweiligen Anlage vorhandenen Module, sowie die Eingabe des Einwohnerwertes, des Zulaufvolumenstromes, und der Zulaufkonzentrationen (CSB, TN und TP). Zudem wird die Spezifizierung der Sandfangart, der Belüftungsart im Belebungsbecken und des Fällmittels der Phosphorelimination vorgenommen. Sind die Aggregattypen hinsichtlich Eindickung, Entwässerung und Trocknung oder die jeweils erreichbaren TG bekannt, werden auch diese zur Spezifizierung herangezogen. Alle anderen nutzerspezifisch definierbaren Inputparameter werden nicht festgelegt, womit bei den gezeigten Validierungsergebnissen die Massen- und Energieströme auf den Berechnungsansätzen in OPTIEVLEX basieren, die Literaturdaten miteinbeziehen.

5.8.1.1 Validierung der Massenbilanzierung des Systems „kommunale ARA“

Die relativen Abweichungen der trockenen Schlammmassenströme  $\dot{m}_{TS,S}$ , sowie des Faulgasnormvolumenstromes  $\dot{V}_{FG}$  sind in Abbildung 5-37 dargestellt. Die Sekundär- und Tertiärschlämme werden dabei zusammengeführt, um eine bessere Vergleichbarkeit mit den Realdaten zu ermöglichen. Es gilt zu beachten, dass die Anlagen 1 und 2 eine aerobe Schlammstabilisierung durchführen und damit kein Primärschlamm auftritt.

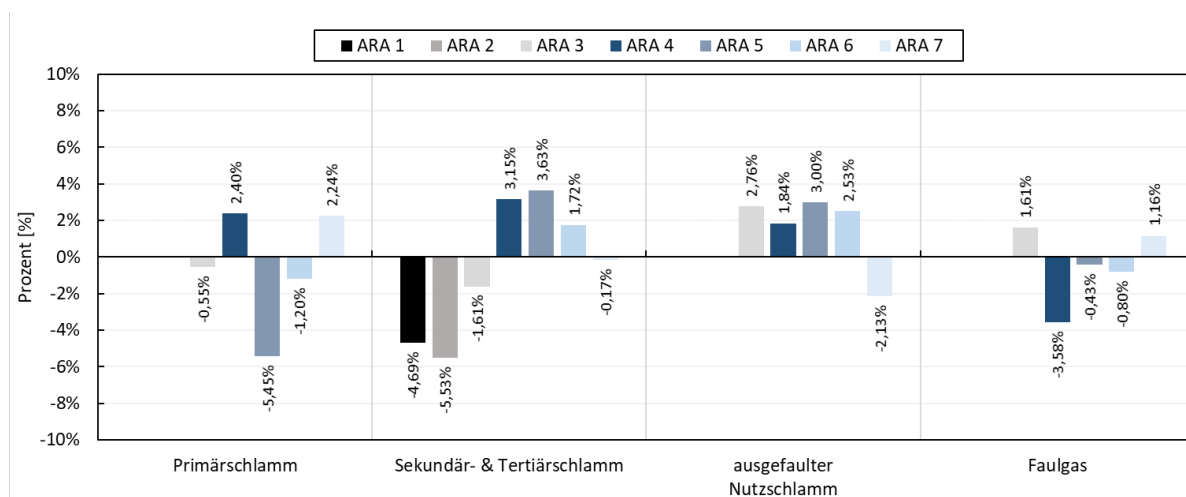


Abbildung 5-37: Validierungsergebnisse zum System „kommunale ARA“ – Relative Abweichungen der trockenen Nutzschlammmassenströme und Faulgasnormvolumenströme der ARAs 1 – 7

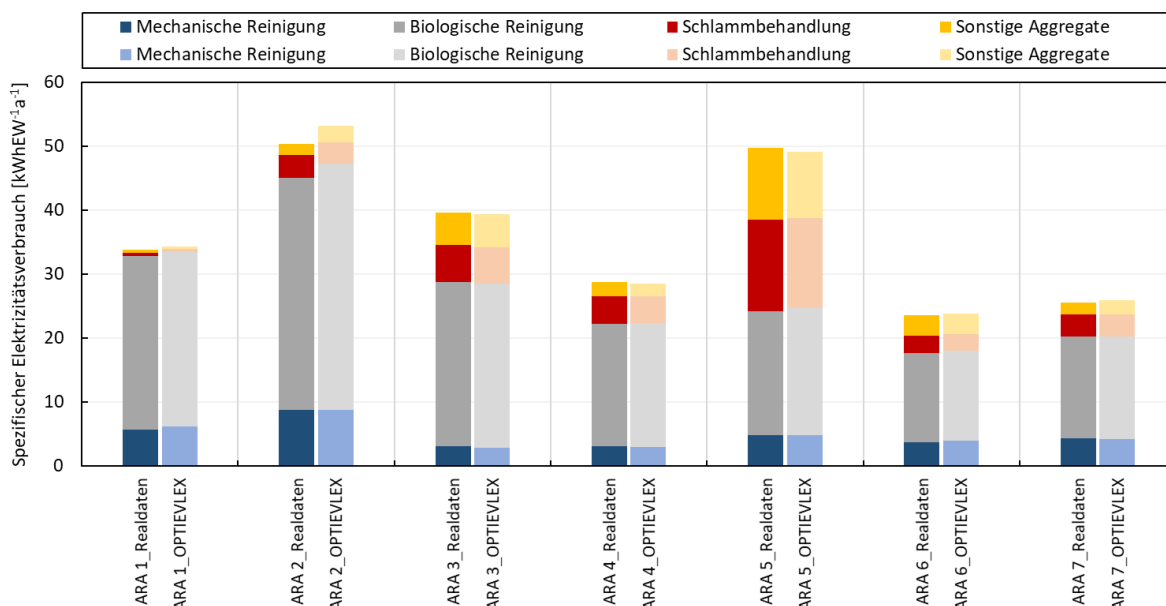


Bezüglich des ausgefaulten Nutzschlammes  $\dot{m}_{TS,NSnFT}$  in Kombination mit dem Faulgas sind bei ARA 4 - 6 Tendenzen zu erkennen. Dies ist auf den Abbaugrad im Faulturm zurückzuführen. Ist der in OPTIEVLEX ermittelte Abbaugrad niedriger als bei realen Bedingungen, sind die berechneten Schlammmassenströme zu hoch, während zu niedrige Faulgasnormvolumenströme auftreten. Für ARA 7 gilt das umgekehrte Verhältnis. Die hohen Abweichungen bei dem Faulgas der ARA 4 könnte auf Fackelverlusten beruhen. ARA 3 folgt nicht diesen Überlegungen. Dies könnte sich aus einem höheren TG des Nutzschlammes in OPTIEVLEX im Vergleich zu den realen Bedingungen ergeben.

Die relativen Abweichungen liegen generell unter der 10 %-Grenze, womit die Ströme als positiv validierte Grundlage für die nächsten Modellschritte gelten. Eine Anpassung der Modellierung ist nicht erforderlich, vor allem da detaillierter spezifizierte Eingabeparameter eine stärkere Annäherung an Realdaten ermöglichen.

### 5.8.1.2 Validierung der Energiebilanzierung des Systems „kommunale ARA“

Abbildung 5-38 zeigt das Validierungsergebnis der elektrischen Energiebilanz des Systems „kommunale ARA“. Dabei erfolgt eine Kumulierung des Bedarfs der Aggregate nach Reinigungsstufen. Die Kategorie Sonstiges beinhaltet den Elektrizitätsbedarf der Infrastruktur und zusätzlicher Reinigungsprozesse.



**Abbildung 5-38: Validierungsergebnisse zum System „kommunale ARA“ – Spezifischer Elektrizitätsbedarf nach Reinigungs- und Schlammbehandlungstufen der ARAs 1 – 7**

Bei Betrachtung der mechanischen Reinigung zeigen sich nur geringe absolute Abweichungen. Die ARA 1 zeigt mit einer Abweichung von 0,45 kWh<sub>el</sub>EW<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> (relative Abweichung ≈ 8 %) deutlich höhere Werte als die ARAs 2 – 7, welche Abweichungen ≤ 0,16 kWh<sub>el</sub>EW<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> (relative Abweichung ≤ 5 %) aufweisen. Dies ist auf eine erhöhte Leistung der Sandfanggebläse in

OPTIEVLEX zurückzuführen, was mit großer Wahrscheinlichkeit mit abweichenden Literaturwerten zum Wirkungsgrad des ausgewählten Gebläsetyps in Verbindung steht. Da alle relativen Abweichungen  $< 10\%$  sind, werden keine Modellanpassungen vorgenommen. Die mechanische Reinigung beinhaltet in keiner ARA Aggregate mit Wärmeverbrauch.

In Abbildung 5-38 wird ersichtlich, dass ARA 2 mit  $2,16 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  die höchste absolute Abweichung (relative Abweichung  $\approx 6\%$ ) hinsichtlich der biologischen Reinigung aufweist. Dies ist vor allem auf einen zu hohen simulierten Elektrizitätsbedarf des Belebungsbeckengebläses zurückzuführen. Da auch der SS-TTS-Massenstrom der ARA 2 zu niedrig ist, ist dies mit hoher Wahrscheinlichkeit mit dem bereits erwähnten zu hohen Schlammalter verbunden. Die restlichen ARAs zeigen nur geringe Abweichungen  $< 0,54 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  (relative Abweichung  $\leq 2,8\%$ ). Da hier keine relativen Abweichungen  $> 10\%$  vorliegen werden keine Modellanpassungen vorgenommen. Die biologische Reinigung beinhaltet in keiner ARA Aggregate mit Wärmeverbrauch.

Die Schlammbehandlung weist in allen ARAs relative Abweichungen  $\leq 3\%$  auf, womit diese unter der Grenze von  $10\%$  liegen. In ARAs mit anaerober Stabilisierung führt die Faulung zusätzlich zu einem Wärmebedarf, wobei ARA 7 zudem über einen Schlammrockner verfügt. Die relativen Abweichungen liegen bei allen thermischen Aggregaten unter  $5\%$ , womit hier die  $10\%$ -Grenze nicht überschritten wird. Modellanpassungen sind daher nicht anzudenken.

Die sonstigen Aggregate weisen zum Teil sehr hohe Abweichungen auf (absolute Abweichung: ARA 1 =  $0,19 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$ , ARA 2 =  $-0,75 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$  und ARA 7  $< -0,42 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}$ ; relative Abweichungen: ARA 1  $\approx 39\%$ , ARA 2  $\approx 42\%$  und ARA 7  $\approx 23\%$ ). Diese Kategorie stellt auch in den Realdaten eine kumulierte Kategorie dar, womit Ursachen schwer zu erfassen sind. Da Nutzerspezifikationen in OPTIEVLEX eine Anpassung an reale Gegebenheiten ermöglichen wird angenommen, dass hier keine Modellanpassungen notwendig sind.

## **5.8.2 Validierung Schritt 2: Stationäre Massen- und Energiebilanzierung des erweiterten Systems „Energieverbund“**

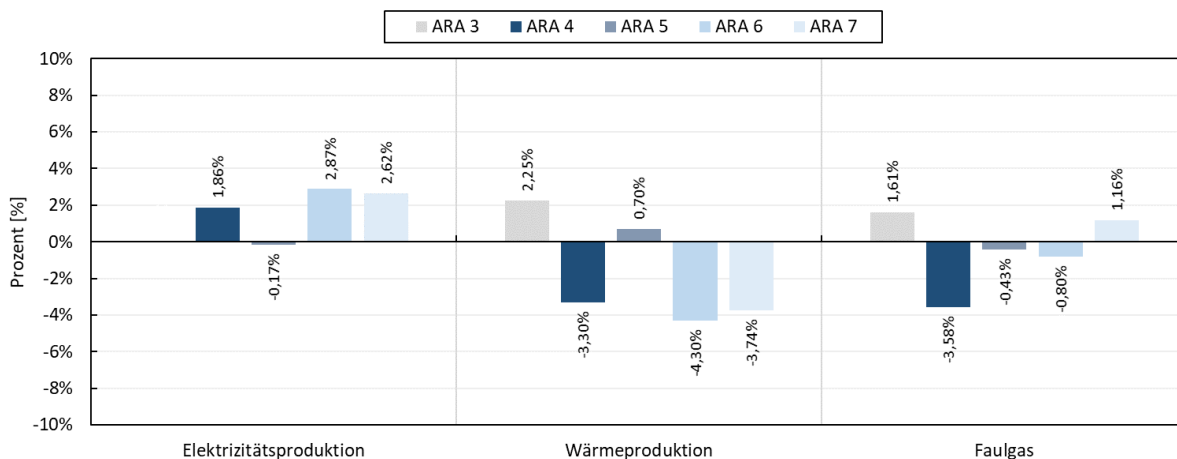
Die nachfolgenden Unterkapitel dienen der Darstellung der Validierungsergebnisse zu den Modulen „Faulgasnutzung“, „Trockner“ und „Klärschlammnutzung“.

### *5.8.2.1 Validierung der Massenbilanzierung des Moduls „Faulgasnutzung“*

Die Validierung des dem Modul „Faulgasnutzung“ zugeführtem Faulgasnormvolumenstromes  $\dot{V}_{FG}$  erfolgte bereits im Zuge des Kapitels 5.8.1 (siehe Abbildung 5-37). Die Validierung der Abgasmassenströme der Aggregate MGT und HK erfolgt indirekt über die Validierung der Energiebilanz, da über die Abgasmassenströme die Elektrizitäts- und Wärmeaufbringung ermittelt wird.

5.8.2.2 Validierung der Energiebilanzierung des Moduls „Faulgasnutzung“

Die Validierung des Einsatzes eines BHKWs bzw. eines Heizkessels zur thermischen Faulgasverwertung erfolgt anhand von Realdaten. Dabei liefern die fünf anaeroben Anlagen aus Kapitel 5.8.1 Daten für den Validierungsprozess. Die relativen Abweichungen sind in Abbildung 5-39 ersichtlich. ARA 3 besitzt einen Heizkessel, womit lediglich eine Wärmeerzeugung vorliegt. Die ARAs 4 bis 7 beinhalten BHKWs.



**Abbildung 5-39: Validierungsergebnisse zum System „Energieverbund“ – Relative Abweichung der Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung und des Faulgasnormvolumenstromes des Moduls „Faulgasnutzung“**

Die relativen Abweichungen der Energieaufbringung sind in Zusammenhang mit der in Kapitel 5.8.1.1 diskutierten Validierung der Faulgasnormvolumenströme zu betrachten. Daher werden die diesbezüglichen Validierungsergebnisse hier wiederholt aufgezeigt. Die im Vergleich zur Realanlage erhöhte Wärmeerzeugung der ARA 3 ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf die erhöhte Faulgasmenge zurückzuführen. Die Resultate zur ARA 4 könnten die Annahme von Fackelverlusten aus Kapitel 5.8.1.1 untermauern, da bei zu niedriger Faulgasmenge eine zu hohe elektrische Aufbringung auftritt. Zudem könnte das gegenläufige Verhalten der Abweichungen der elektrischen und thermischen Energieaufbringung einen Hinweis auf Abweichungen bei den in OPTIEVLEX hinterlegten BHKW-Wirkungsgraden  $\eta$  liefern. Die erhöhte Elektrizitätsaufbringung führt hier zu einer reduzierten Wärmeerzeugung. Dieses gegenläufige Verhalten ist auch bei den ARAs 5 – 7 erkennbar und stellt auch hier eine mögliche Begründung der Abweichungen dar.

Da keine der sieben ARAs eine Mikrogasturbine betreibt werden die in OPTIEVLEX berechneten  $\eta_{el}$  und  $\eta_{th}$  mit den Wirkungsgraden einer Capstone Mikrogasturbine mit einer Leistung von 70 kW<sub>el</sub> bei Biogasverwertung verglichen. Bei Vollastbetrieb erreicht die MGT einen  $\eta_{el}$  von 25,8 % und einen  $\eta_{th}$  von 42,8 %. [72] In OPTIEVLEX wird bei derselben elektrischen Leistung ein  $\eta_{el}$  von 24,8 % und ein  $\eta_{th}$  von 43,3 % ermittelt. Die relativen Abweichungen liegen damit bei - 3,9 % und + 1,2 %.

Die relativen Abweichungen im Modul „Faulgasnutzung“ liegen generell unter 10 %. Eine Anpassung der Modellierung ist daher nicht erforderlich, da auch hier Nutzerspezifikationen eine weitere Annäherung an Realdaten bewirken können.

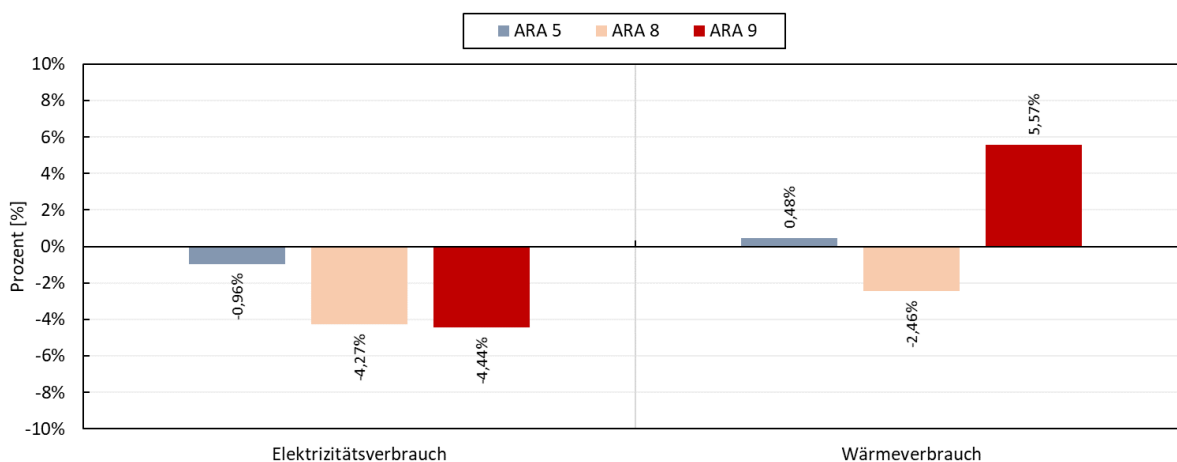
### 5.8.2.3 Validierung der Massenbilanzierung des Moduls „Trockner“

Zur Validierung des Moduls „Trockner“ werden die realen Massenströme und Energiebedarfsdaten der ARA 5 aus Kapitel 5.8.1.1 herangezogen. Zudem werden die Output-Ströme und Energiebedarfsdaten der Trockner zweier kommunaler ARAs der GK5, nachfolgend als ARA 8 (rund 120.000 EW) und ARA 9 (rund 300.000 EW) bezeichnet, erhoben. Die relativen Abweichungen des Elektrizitäts- und Wärmebedarfs sind in Abbildung 5-40 (Kapitel 5.8.2.4) ersichtlich.

Da bei der ARA 5 der in OPTIEVLEX hinterlegte Literaturwert zum TG nach Entwässerung nur um 0,5 % höher liegt als bei den Realdaten, gilt auch hier die relative Abweichung des trockenen ausgefaulten Schlammstromes aus Schritt eins (siehe Abbildung 5-37). Aufgrund der übereinstimmenden TG nach Trocknung liegen beim ausgehenden feuchten Massenstrom keine Abweichungen vor.

Bei ARA 8 und 9 werden im Zuge der Validierung der TG nach Entwässerung und der trockene Schlammstrom  $\dot{m}_{TS,NSnE}$  aus den Realdaten übernommen, um eine Validierung zu ermöglichen. Der TG nach Trocknung wird über die Auswahl des Trockners bestimmt. Hier wurde ein Niedertemperaturbandtrockner gewählt. ARA 8 und 9 weisen hinsichtlich des Nutzschlammstromes nach Trocknung  $\dot{m}_{TS,NSnT}$  relative Abweichungen  $\leq 1,2\%$  auf. Eine Validierung der Massenströme mit zusätzlichen Realdaten ist zu empfehlen, um die dem Berechnungsansatz zugrundeliegenden Literaturdaten detaillierter überprüfen zu können.

### 5.8.2.4 Validierung der Energiebilanzierung des Moduls „Trockner“



**Abbildung 5-40: Validierungsergebnisse zum System „Energieverbund“ – Relative Abweichung des Elektrizitäts- und Wärmebedarfs des Moduls „Trockner“**

Die in Abbildung 5-40 aufgezeigten relativen Abweichungen sind auf die in OPTIEVLEX hinterlegten Bedarfsliteraturdaten zurückzuführen. Hinsichtlich des Elektrizitätsbedarfs ist ein Trend zu erkennen, der auf etwas zu geringe Literaturwerte hinweist. Der Wärmebedarf zeigt keinen klaren Trend bezüglich zu hoher oder zu niedriger Modellergebnisse. Eine Validierung mit weiteren Realdaten im Rahmen zukünftiger Forschungstätigkeiten könnte hier Abhilfe leisten. Die relativen Abweichungen liegen unter der 10 %-Grenze, womit keine Modelländerungen angedacht sind.

5.8.2.5 Validierung der Massenbilanzierung des Moduls „Klärschlammnutzung“

Das Modul „Klärschlammnutzung“ umfasst dezentrale Aggregate zur Verbrennung und Vergasung von Nutzschlamm, sowie zur thermischen Verwertung von Produktgasen. Da diese Aggregate noch keinen Stand der Technik darstellen (siehe Kapitel 2.3) konnten im Zuge der Dissertation keine vollständigen Daten von Energieverbunden inkl. Klärschlammnutzung erhoben werden. Daher erfolgt eine separate Validierung des Moduls. Der dem Modul zugeführte Nutzschlammstrom (inkl. TG) nach Trocknung  $\dot{m}_{TS,NSnT}$  stellt eine für die Validierung notwendige Nutzerspezifikation dar und kann daher nicht validiert werden. Validiert werden die Massenströme „Asche“ (Verbrennung und Vergasung), sowie „Luft“ und „Produktgas“ (Vergasung). Hier gilt zu beachten, dass das simulierte Nutzschlamm-Asche-Verhältnis je Schlammgruppe der Vergasung für die Verbrennung übernommen wird, womit eine gemeinsame Validierung der Verwertungsmöglichkeiten erfolgen kann. Die mit Aspen Plus (siehe Kapitel 5.5) ermittelten Massenströme werden anhand von Daten der Kopf SynGas GmbH & Co. KG überprüft. Die Daten basieren auf zwei aeroben und zwei anaeroben Schlämmen die unterschiedlichen Schlammgruppen, welche in der Klammer ersichtlich sind, zugehören. Das Validierungsergebnis ist in Abbildung 5-41 dargestellt.

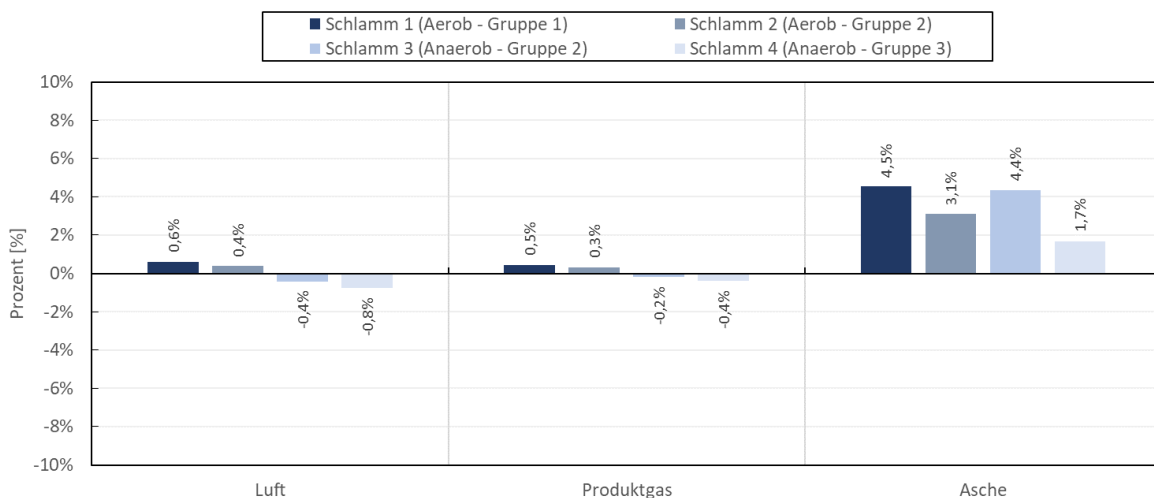


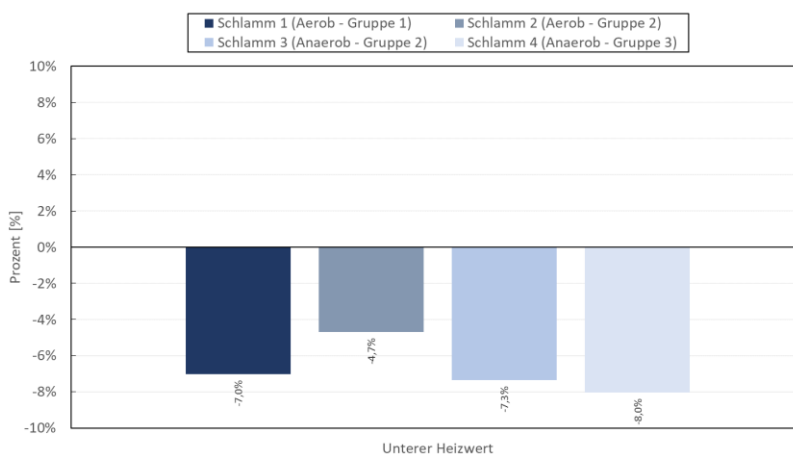
Abbildung 5-41: Validierungsergebnisse zum System „Energieverbund“ – Relative Abweichung des Luft-, Produktgas- und Aschemassenstromes des Moduls „Klärschlammnutzung“

Grundsätzlich zeigen sich in Abbildung 5-41 geringe relative Abweichungen hinsichtlich der Massenströme. Nur bei den Aschenmassenströmen  $\dot{m}_{TS,A}$  treten relative Abweichungen  $\geq 1,7\%$  auf. Dies könnte durch abweichende Vergasungstemperaturen oder einen zu geringen Koksumsatz im Simulationsmodell begründet sein. Da die relativen Abweichungen jedoch unter der 10 %-Grenze liegen werden keine Modellanpassungen vorgenommen.

Die Validierung des Abgasmassenstromes des Klärschlammverbrennungsaggregates, sowie des Heizkessels zur Produktgasverwertung erfolgt indirekt über die Validierung der Energiebilanz, da mittels der Abgasmassenströme die Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung (siehe Kapitel 5.4.4.2) ermittelt wird.

#### 5.8.2.6 Validierung der Energiebilanzierung des Moduls „Klärschlammnutzung“

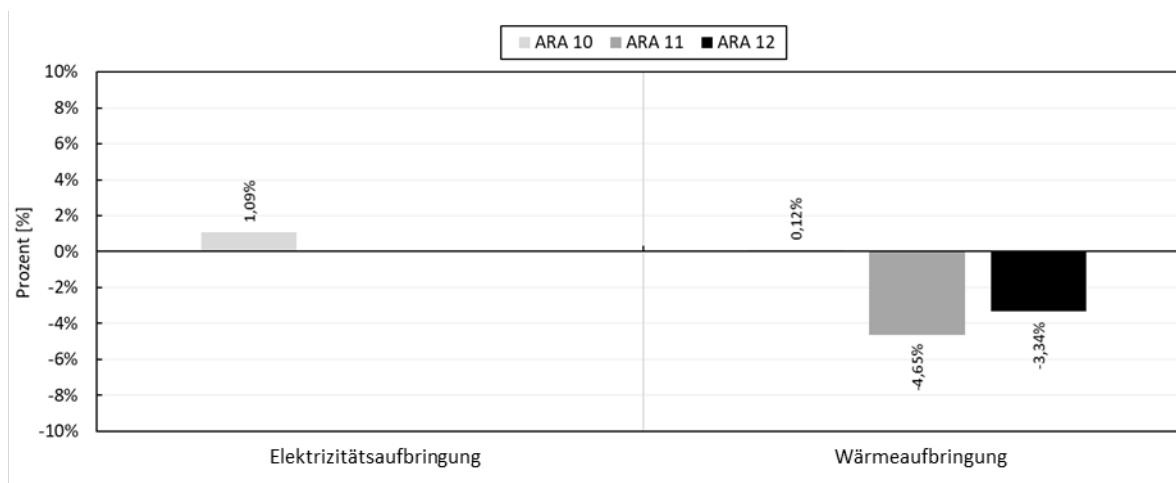
Der über das Aspen Plus Simulationsmodell ermittelte untere Heizwert des Produktgases wird anhand der vorab erwähnten Daten der Kopf SynGas GmbH & Co. KG überprüft. Das Validierungsergebnis ist in Abbildung 5-42 ersichtlich.



**Abbildung 5-42: Validierungsergebnisse zum System „Energieverbund“ – Relative Abweichung des Produktgasheizwertes des Moduls „Klärschlammnutzung“**

Die relativen Abweichungen des Heizwertes verstärken in Kombination mit dem Aschemassenstrom  $\dot{m}_{TS,A}$  (siehe Abbildung 5-41) die vorab getroffenen Annahmen hinsichtlich Vergasungstemperatur und Koksumsatz. Ein höherer Koksumsatz würde eine Verringerung des Aschemassenstromes, sowie eine Erhöhung des Heizwertes mit sich bringen. Aufgrund der Unterschreitung der 10 %-Grenze werden im Rahmen der Dissertation keine Modellanpassungen vorgenommen. Die Erhöhung der Modellgenauigkeit könnte Ziel zukünftiger Forschungstätigkeiten sein.

Abbildung 5-43 zeigt das Validierungsergebnis hinsichtlich der relativen Abweichungen der Elektrizitäts- und Wärmeaufbringung von dezentralen Klärschlammverwertungsaggregaten dreier ARAs. ARA 10 (rund 300.000 EW) verfügt über ein Vergaser-BHKW-Modul, ARA 11 (rund 75.000 EW) über einen Drehrohrkessel und ARA 12 (rund 250.000 EW) über eine stationäre Wirbelschichtfeuerung. ARA 10 verfügt daher neben der Wärmeaufbringung über eine Elektrizitätsaufbringung.



**Abbildung 5-43: Validierungsergebnisse zum System „Energieverbund“ – Relative Abweichung der Elektrizitäts- und Wärmeaufbringung des Moduls „Klärschlammnutzung“**

Generell liegen die relativen Abweichungen in Abbildung 5-43 unter der 10 %-Grenze. ARA 10 zeigt trotz zu niedriger Heizwerte beim Produktgas keine zu geringe elektrische und thermische Energieaufbringung auf, was auf etwas zu hohe Wirkungsgrade des BHKWs hinweisen könnte. Die Wärmeaufbringung der ARAs 11 und 12 weist niedrigere simulierte als reale Werte auf. Dies kann auf zu hohe Verlustwärmeströme (siehe Kapitel 5.4.4.2) hinweisen.

Die Ermittlung der Wärmeaufbringung des Heizkessels erfolgt analog zum Modul „Faulgasnutzung“. Der Berechnungsansatz wurde bereits in Kapitel 5.8.2.2 validiert. Der Berechnungsansatz zur Ermittlung der Elektrizitäts- und Wärmeaufbringung bei Anlagen inkl. ORC kann aufgrund fehlender Daten nicht validiert werden. Da der Berechnung Wirkungsgrade gemäß Literatur zugrunde liegen wird keine Validierung auf Basis von Literaturdaten durchgeführt.

## 6 ANALYSEN MIT OPTIEVLEX

Zur Erreichung der Teilziele 7 – 10 gemäß Kapitel 4.3 werden mit OPTIEVLEX Analysen vorgenommen. Die Analysen dienen dazu, die Einsatzmöglichkeiten von OPTIEVLEX aufzuzeigen und eine Datengrundlage zur Beantwortung der in Kapitel 4 aufgestellten offenen Forschungsfragen zu generieren. Die Resultate werden in Kapitel 7 zur Ableitung von Schlussfolgerungen zusammengeführt und diskutiert. Details zu den durchgeführten Analysen hinsichtlich Vorgehensweise und Ergebnisse werden nachfolgend kurz erläutert.

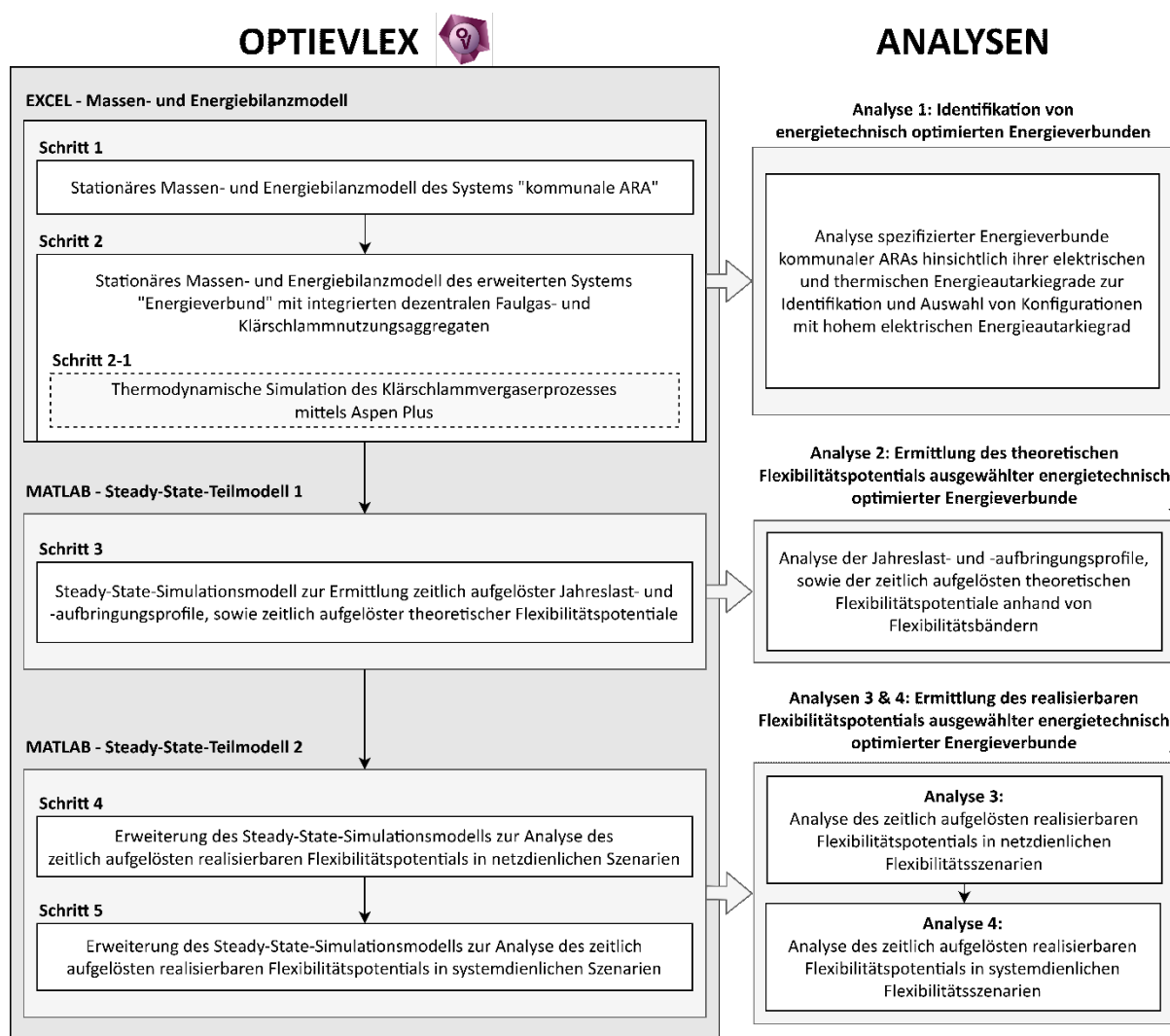


Abbildung 6-1: Übersicht über die Analysen mit OPTIEVLEX



### ANALYSE 1: IDENTIFIKATION VON ENERGIETECHNISCH OPTIMIERTEN ENERGIEVERBUNDEN

Gemäß Abbildung 6-1 wird die Analyse 1 mit dem stationären Massen- und Energiebilanzmodell durchgeführt. Im Rahmen der Analyse werden diverse Energieverbunde, mit den Systemgrenzen gemäß Kapitel 5.4.1, hinsichtlich ihrer elektrischen und thermischen Energieautarkiegrade untersucht. Ziel ist die Identifikation von energietechnisch optimierten Energieverbunden mit hohem elektrischen Energieautarkiegrad, welche in den nachfolgenden Analysen detaillierter untersucht werden. Details zur Analyse 1 sind in Kapitel 6.1 ersichtlich.

### ANALYSE 2: ERMITTLUNG DES THEORETISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENTIALS AUSGEWÄHLTER ENERGIETECHNISCH OPTIMierter ENERGIEVERBUNDE

Die Analyse 2 wird gemäß Abbildung 6-1 mit dem Steady-State-Teilmodell 1 durchgeführt. Dabei werden ausgewählte energietechnisch optimierte Energieverbunde hinsichtlich ihrer Jahreslast- und -aufbringungsprofile, sowie ihrer zeitlich aufgelösten theoretischen Flexibilitätspotentiale in Form von Flexibilitätsbändern untersucht. Ziel ist die Schaffung einer Datengrundlage für die Analyse 3, womit eine Auflösung in 15 min-Zeitschritten erforderlich ist. Detail zur Analyse 2 sind in Kapitel 6.2 zu finden.

### ANALYSEN 3 UND 4: ERMITTLUNG DES REALISIERBAREN FLEXIBILITÄTSPOTENTIALS AUSGEWÄHLTER ENERGIETECHNISCH OPTIMierter ENERGIEVERBUNDE

Nach Abbildung 6-1 werden die Analysen 3 und 4 mit dem Steady-State-Teilmodell 2 durchgeführt. Im Zuge der Analysen werden die realisierbaren Flexibilitätspotentiale der ausgewählten energietechnisch optimierten Energieverbunde in netz- und systemdienlichen Szenarien ermittelt und detailliert untersucht. Ziel ist die Ableitung der Kosten-, Energie- und Flexibilitätsskennzahlen gemäß Kapitel 5.2 für die ausgewählten Energieverbunde und je Szenario. Details zu den Analysen 3 und 4 sind in Kapitel 6.3 nachlesbar.

## **6.1 Analyse 1: Identifikation von energietechnisch optimierten Energieverbunden**

Die Analyse 1 dient der Identifikation von energietechnisch optimierten Energieverbunden, mit hohem elektrischen und thermischen Energieautarkiegrad (EAG) gemäß Kapitel 5.2, welche hinsichtlich ihrer theoretischen und realisierbaren elektrischen Flexibilitätspotentiale untersucht werden. Dabei ist hervorzuheben, dass der EAG auf eine ARA-interne Energieaufbringungseinheit hinweist, welche zur Erhöhung des Flexibilitätspotentials beitragen kann (siehe Kapitel 3.2.2). Um energietechnisch optimierte Energieverbunde identifizieren zu können werden mit OPTIEVLEX 17 Energieverbunde, welche verschiedene ARA-Konfigurationen nach Tabelle 6-1 repräsentieren, analysiert. Der Aufbau der Energieverbunde ist durch Kreuze und die Zusammenführung der jeweiligen Abkürzungen erkennbar.

**Tabelle 6-1: Mittels OPTIEVLEX untersuchte Energieverbunde zur Ermittlung des jeweiligen thermischen und elektrischen Energieautarkiegrads**

Energieverbund Nr.	Energieverbund Akronym	System „kommunale ARA“ Verfahren zur Schlammstabilisierung		Modul „Faulgasnutzung“ Aggregat zur thermischen Faulgasverwertung			Modul „Trockner“ Aggregat zur Klärschlamm-trocknung (T)	Modul „Klärschlammnutzung“ Aggregat zur thermischen Klärschlammverwertung					
		aerob (aARA)	anaerob (anARA)	Blockheiz-kraftwerk (BHKW)	Mikrogas-turbine (MGT)	Heiz-kessel (HK)		Verbrennung (VB)	Verbrennung inkl. ORC (VB-ORC)	Vergaser inkl. BHKW (VG-BHKW)	Vergaser inkl. HK (VG-HK)	Vergaser inkl. HK & ORC (VG-HK-ORC)	
1	aARA	x											
2	aARA_T	x					x						
3	aARA_T_VB	x					x	x					
4	aARA_T_VB-ORC	x					x		x				
5	aARA_T_VG-BHKW	x					x			x			
6	aARA_T_VG-HK	x					x				x		
7	aARA_T_VG-HK-ORC	x					x						x
8	anARA		x										
9	anARA_BHKW		x	x									
10	anARA_MGT		x		x								
11	anARA_HK		x			x							
12	anARA_BHKW_T		x	x			x						
13	anARA_BHKW_T_VB		x	x			x	x					
14	anARA_BHKW_T_VB-ORC		x	x			x		x				
15	anARA_BHKW_T_VG-BHKW		x	x			x			x			
16	anARA_BHKW_T_VG-HK		x	x			x				x		
17	anARA_BHKW_T_VG-HK-ORC		x	x			x						x

Der Energieverbund 1 (aARA) stellt die Stand-der-Technik-Konfiguration einer kommunalen Belebungsanlage mit simultaner aerober Schlammstabilisierung gemäß Kapitel 2.2.2 dar. Der Energieverbund 8 (anARA) bildet eine unübliche Analgenkonfiguration ab, da Belebungsanlagen mit mesophiler anaerober Schlammstabilisierung (siehe Kapitel 2.2.2) meist ein Aggregat zur thermischen Faulgasverwertung beinhalten. Dieser Energieverbund gilt lediglich als Vergleichsverbund für den Energieverbund 1, womit die Energieverbunde 9 – 11 die Stand-der-Technik-Konfigurationen einer Belebungsanlage mit anaerober Schlammstabilisierung abbilden. Die Energieverbunde 2 – 7 und 12 – 17 bilden erweiterte Energieverbunde ab welche Aggregate zur Klärschlamm-trocknung und/oder thermischen Klärschlammverwertung beinhalten. Diese Energieverbunde stellen keinen Stand der Technik dar, gewinnen jedoch unter anderem aufgrund zunehmender Restriktionen hinsichtlich der landwirtschaftlichen Klärschlammnutzung und dem Anstreben energieeffizienter Energieverbunde stark an Attraktivität (siehe Kapitel 2.3).

### 6.1.1 Spezifikation des Systems „Energieverbund“

Die nachfolgenden Unterkapitel dienen der Definition der Nutzerspezifikationen des Systems „kommunale ARA“, sowie der Module „Faulgasnutzung“, „Trockner“ und „Klärschlammnutzung“.

#### 6.1.1.1 Definition der Nutzerspezifikationen des Systems „kommunale ARA“

Die Energieverbunde gemäß Tabelle 6-1 bilden Belebungsanlagen mit aerobem (a) oder anaerobem (an) Schlammstabilisierungsverfahren ab (siehe Kapitel 2.2.2). Um eine Vergleichbarkeit der beiden Verfahren zu gewährleisten, wird das System „kommunale ARA“ gemäß Kapitel 5.3 für eine aerobe (aARA) und eine anaerobe Belebungsanlage (anARA) definiert. Die im System integrierten Module, sowie vorgenommene Spezifikationen sind in Tabelle 6-2 ersichtlich. Neben den Spezifikationen werden, die in OPTIEVLEX hinterlegten, Literaturwerte zur Berechnung der Ergebnisse herangezogen. Die Literaturwerte und zugehörigen Berechnungsansätze werden in den Kapiteln 5.3.4 bis 5.3.13 näher erläutert.

**Tabelle 6-2: Definition der Nutzerspezifikationen des Systems „kommunale ARA“ für die mit OPTIEVLEX durchgeführten Analysen**

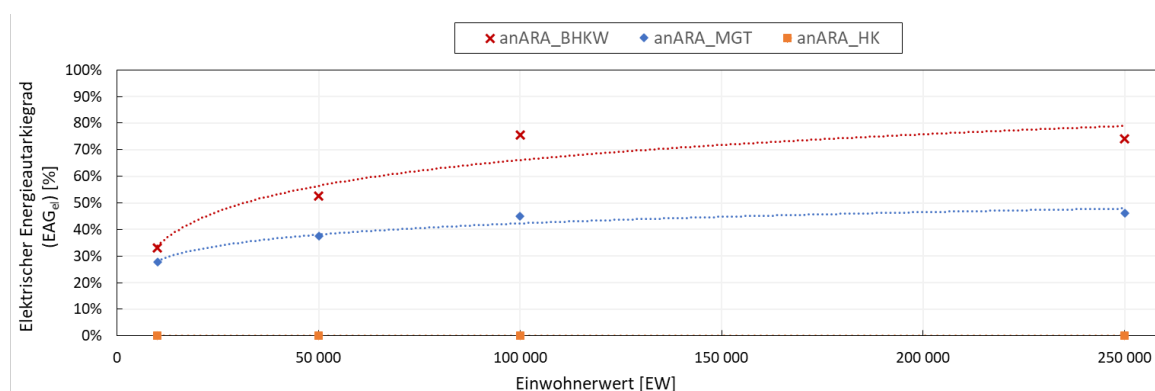
Größenklasse	aARA	anARA	Einwohnerwert		
GK	3 - 5	3 - 5	10.000 EW (GK3), 50.000 EW (GK4), 100.001 EW (GK5) und 250.001 EW (GK5)		
Verfahren zur Schlammstabilisierung	aARA	anARA	Inkludierte Verfahrensschritte		
Schlammstabilisierung	aerob	anaerob	Inkl. De- und Nitrifikation		
Module	aARA	anARA	Verfahrensdetails	Betriebsstunden	erreichter Trockengehalt
Zulaufpumpwerk	x	x		8.760	
Rechenanlage	x	x		1.460	
Rechengutwaschanlage	x	x		1.460	
Sand- und Fettfang	x	x	belüftet	8.760	
Sandwaschanlage	x	x		1.460	
Vorklärbecken		x	1,5 h	8.760	
Belebungsbecken	x	x	Druckbelüftung	8.760	
inkl. RZP	x	x	integriert	8.760	
inkl. RLS	x	x	integriert	8.760	
Phosphorelimination	x	x	Eisensalze	8.760	
Nachklärbecken	x	x		8.760	
Voreindicker		x		4.380	5 %
Faulturm		x	38 °C, 25 d	8.760	
Eindicker	x	x		4.380	5 %
Entwässerung	x	x		2.920	32 %

Die in den Analysen berücksichtigten Größenklassen (GK) entsprechen den in Kapitel 2.1 definierten GK gemäß DWA [18]. Die gewählten Einwohnerwerte GK3 (10.000 EW), GK4 (50.000 EW) und GK5 (100.001 & 250.001 EW) sind darauf zurückzuführen, dass Anlagen mit einer Ausbaukapazität < 10.000 EW gemäß Stand der Forschung kein bzw. nur ein geringes Flexibilitätspotential aufweisen (siehe Kapitel 3.2.2.3). [11–14] Zudem stellt ein EW von 10.000 die untere Grenze für einen wirtschaftlichen Einsatz der Schlammfäulung dar. [19, 23] Für die GK4 wird eine Ausbaukapazität von 50.000 EW gewählt, da bei der unteren Grenze von 10.001 EW keine signifikanten Unterschiede bei den Energieautarkiegraden (EAG) im Vergleich zur GK3 zu erwarten sind. Die GK5 wird durch zwei Einwohnerwerte vertreten. Einerseits durch die untere Grenze von 100.001 EW und andererseits durch 250.001 EW, bei welchem aufgrund eines höheren Abwasseranfalls (siehe Kapitel 5.3.2.2), höhere EAGs anzunehmen sind.

Um die Vergleichbarkeit unterschiedlicher GK zu ermöglichen, werden weitere Nutzerspezifikationen hinsichtlich des Schlammstabilisierungsverfahrens und der Anlagenmodule definiert. Dabei orientieren sich die inkludierten Verfahrensschritte, sowie die Auswahl der Module und deren Verfahrensdetails (siehe Tabelle 6-2) an einer realen kommunalen ARA einer mittelgroßen österreichischen Stadt mit rund 25.000 Einwohnern. Diese reale Anlage (ca. 100.001 EW) wird herangezogen, da für die weiteren Analysen Regendaten und Residuallasten der mittelgroßen Stadt in OPTIEVLEX integriert werden. Die Annahmen werden durch Literaturwerte, welche den Stand der Technik gemäß Kapitel 2 repräsentieren, ergänzt. Die reale Anlage ist eine anaerobe Belebungsanlage gemäß dem Stand der Technik und beinhaltet alle Module des Systems „kommunale ARA“ gemäß Kapitel 5.3.1. Die Module der anaeroben ARA-Konfiguration (anARA) sind in Tabelle 6-2 ersichtlich. Die Aufenthaltsdauer im Vorklärbecken wird gemäß DWA-A 131 [74] mit 1,5 h festgelegt. Hinsichtlich der Schlammstabilisierung im Belebungsbecken erfolgt sowohl eine Denitrifikation als auch eine Nitrifikation. Zudem liegen eine interne Rezirkulation und eine Rücklaufschlammpumpe vor. Das Belebungsbecken wird, wie der Sandfang, belüftet ausgeführt. Die Phosphorelimination erfolgt unter Zugabe von Eisensalzen, was dem aktuellen Stand der Technik gemäß Kapitel 2 entspricht [21]. Der Faulturm wird mesophil bei einer Temperatur von 38°C und einer Faulzeit von 25 Tagen betrieben. Die in der Eindickung und Entwässerung erreichbaren Trockengehalte spiegeln durchschnittliche Literaturwerte gemäß DWA [17, 30, 31] wieder. Die Betriebsstunden der Aggregate basieren auf den Angaben gemäß Schäfer et al. [11], die Auslastung ergibt sich aus der jeweiligen Analyse. Für die aerobe ARA-Konfiguration (aARA) werden die Nutzerspezifikationen der anARA weitestgehend übernommen. Es werden jedoch die Module Vorklärbecken, Voreindicker und Faulturm exkludiert. Zudem wird eine simultane aerobe Schlammstabilisierung im Belebungsbecken eingestellt. Die in Tabelle 6-2 dargestellten Nutzerspezifikationen gelten für alle vorab ausgewählten GK.

### 6.1.1.2 Definition der Nutzerspezifikationen des Moduls „Faulgasnutzung“

Da ARA-Konfigurationen mit anaerobem Stabilisierungsverfahren (anARA) über den erneuerbaren Energieträger Faulgas verfügen, können diese Aggregate zur thermischen Faulgasverwertung beinhalten. In OPTIEVLEX stehen gemäß Kapitel 5.4.2 die Aggregate BHKW, MGT und HK zur Auswahl. Um die Anzahl der zu untersuchenden Energieverbunde zu reduzieren, erfolgt eine Analyse der Energieverbunde 9 – 11 (siehe Tabelle 6-1) zur Identifikation des Faulgasnutzungsverfahrens mit dem höchsten elektrischen Energieautarkiegrad ( $EAG_{el}$ ). Hier wird der Fokus auf den  $EAG_{el}$  gelegt, da die Ermittlung von elektrischen Flexibilitätspotentialen und die Untersuchung deren Einsatzes im elektrischen Netz im Rahmen der vorliegenden Dissertation Forschungsziel ist. Bei einem  $EAG_{el} > 0$  ist eine dezentrale (ARA-interne) elektrische Energieaufbringung zu erwarten, welche bei Flexibilisierung der Energieaufbringungseinheiten mit positiven und negativen Flexibilitätspotentialen verbunden ist. Abbildung 6-2 zeigt den  $EAG_{el}$  für die Energieverbunde anARA\_BHKW, anARA\_MGT und anARA\_HK.



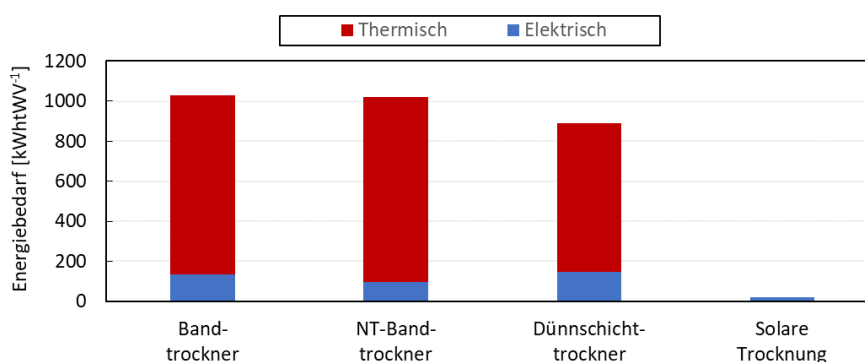
**Abbildung 6-2: Elektrischer Energieautarkiegrad ( $EAG_{el}$ ) nach EW der Energieverbunde anARA\_BHKW/MGT/HK**

Aus Abbildung 6-2 wird ersichtlich, dass der Energieverbund mit Faulgas-Blockheizkraftwerk (anARA\_BHKW) über alle GK hinweg die höchsten  $EAG_{el}$  (maximal 74 %) aufweist. Bei einer integrierten Faulgas-Mikrogasturbine (anARA\_MGT) zeigt sich unabhängig von der GK ein niedrigerer  $EAG_{el}$  (maximal 46 %). Ein Faulgas-Heizkessel (anARA\_HK) ist nicht mit einer elektrischen Energieaufbringung verbunden, womit der  $EAG_{el}$  bei 0 % liegt. Mit dem Ziel einen hohen  $EAG_{el}$  zu erreichen, wird ein BHKW in die Energieverbunde 12 – 17 (siehe Tabelle 6-1) integriert. Um das theoretische Flexibilitätspotential von Energieverbunden kommunaler ARAs im Rahmen der Analyse 2 ermitteln zu können, werden 8.760 Volllaststunden pro Jahr für das BHKW angesetzt. Zur Untersuchung des alleinigen Potentials des Energieträgers Faulgas wird angenommen, dass zu keinem Zeitpunkt eine Zufeuerung von Erdgas durchgeführt wird.

### 6.1.1.3 Definition der Nutzerspezifikationen der Module „Trockner“ & „Klärschlammnutzung“

Um die Auswirkungen von dezentralen (ARA-internen) Konzepten zur thermischen Klärschlammverwertung auf den  $EAG_{el}$  zu analysieren, wird ein Trockner (T) in die Energieverbunde 2 und 12 (siehe Tabelle 6-1), sowie zusätzlich ein Aggregat zur thermischen Klärschlammverwertung in die Energieverbunde 3 – 7 und 13 – 17 nach Tabelle 6-1 inkludiert.

In OPTIEVLEX sind im Rahmen des Moduls „Trockner“ acht Aggregattypen wählbar. Zur Reduktion der Anzahl der zu untersuchenden Energieverbunde erfolgt vorab eine separate Analyse der Aggregatoptionen. Da der elektrische und thermische Energiebedarf des Trockners zu einer Reduktion des elektrischen und thermischen EAG des Energieverbundes führt, ist die Auswahl eines Trockners mit möglichst niedrigem Energiebedarf das Ziel. Aufgrund des Forschungszieles steht der elektrische Energiebedarf im Fokus. Um eine Vergleichbarkeit der Energieverbunde nach Tabelle 6-1 und der verschiedenen GK zu ermöglichen, wird der ausgewählte Trocknertyp in alle Energieverbunde integriert. Dabei gilt zu beachten, dass nur Bandtrockner, Dünnschichttrockner und die Solare Trocknung gemäß Literatur [69] für kleine GK einsetzbar sind. Aufgrund des erforderlichen Trockengehalts für die Vergasung (siehe Kapitel 5.5.1) gilt zu überprüfen ob die Typen eine ausreichende Trocknung gewährleisten. Für die weiteren Analysen wird in OPTIEVLEX der zu erreichende Trockengehalt mit 95 % festgelegt, um eine autotherme Verbrennung bzw. Vergasung sicherzustellen. Alle vorab genannten Trocknertypen erfüllen dieses Kriterium. In Abbildung 6-3 werden diese abschließend auf Basis ihres durchschnittlichen spezifischen elektrischen und thermischen Energiebedarfs pro Tonne zu verdampfendem Wasser verglichen. [69]



**Abbildung 6-3: Spezifischer elektrischer und thermischer Energiebedarf ausgewählter Trockneraggregate**

Bei Analyse der Abbildung 6-3 wird ersichtlich, dass die solare Trocknung mit keinem thermischen und einem niedrigen elektrischen Bedarf von 20 kWh<sub>el</sub>tWV<sup>-1</sup> verbunden ist. Diese Form der Trocknung ist jedoch durch einen hohen Platz- und Zeitaufwand gekennzeichnet. Zudem ist der Trocknungsgrad nur schwer einstellbar, was bei nachfolgender dezentraler Verwertung zu Problemen, wie z.B. Anbackungen von Klärschlamm in der Thermolyseschnecke des Vergasers, führen kann. Der Niedertemperatur-Bandtrockner

(NT-Bandtrockner) weist mit einem Wert von rund  $98 \text{ kWh}_{\text{el}}\text{tWV}^{-1}$  den nächsthöchsten Elektrizitätsbedarf auf (Wärmebedarf  $\approx 920 \text{ kWh}_{\text{th}}\text{tWV}^{-1}$ ) und wird aufgrund der besseren Steuerbarkeit für die weiteren Analyseschritte als Trockner hinterlegt. Die Volllaststunden des Trockners werden mit  $2.920 \text{ ha}^{-1}$  festgelegt und orientieren sich damit an denen der vorhergehenden Entwässerung gemäß Schäfer et al. [11].

Hinsichtlich des Moduls „Klärschlammnutzung“ werden alle in OPTIEVLEX spezifizierbaren Lösungskonzepte gemäß Tabelle 6-1 im Rahmen von Energieverbunden untersucht. Dazu zählen die Verbrennung (VB) exklusive und inklusive ORC (VB-ORC), die Vergasung inkl. BHKW (VG-BHKW), sowie die Vergasung mit HK (VG-HK) exklusive und inklusive ORC (VG-HK-ORC). Dabei wird angenommen, dass die Lösungskonzepte technisch ausgereift sind und über eine hohe Kompatibilität mit dem Stand der Technik verfügen. Um auch hier das theoretische Flexibilitätspotential ermitteln zu können werden auch hier Volllaststunden von  $8.760 \text{ ha}^{-1}$  angesetzt. Zur Untersuchung des vollen Potentials des erneuerbaren Energieträgers Produktgas wird angenommen, dass zu keinem Zeitpunkt eine Zufueuerung von Erdgas durchgeführt wird.

### 6.1.2 Analyse und Diskussion der Energieverbunde anhand der elektrischen und thermischen Energieautarkiegrade

In Abbildung 6-4 wird auf Basis der hinterlegten Spezifikationen gemäß Kapitel 6.1.1 der thermische und elektrische EAG je Energieverbund (siehe Tabelle 6-1) für die GK5 illustriert. Da alle GK eine ähnliche Verteilung aufweisen erfolgt die Diskussion der Erkenntnisse anhand der Ausbaupazität von 100.001 EW. Dieser Einwohnerwert wird gewählt, da die den Energieverbunden zugrunde gelegte reale Kläranlage diese Ausbaupazität aufweist.

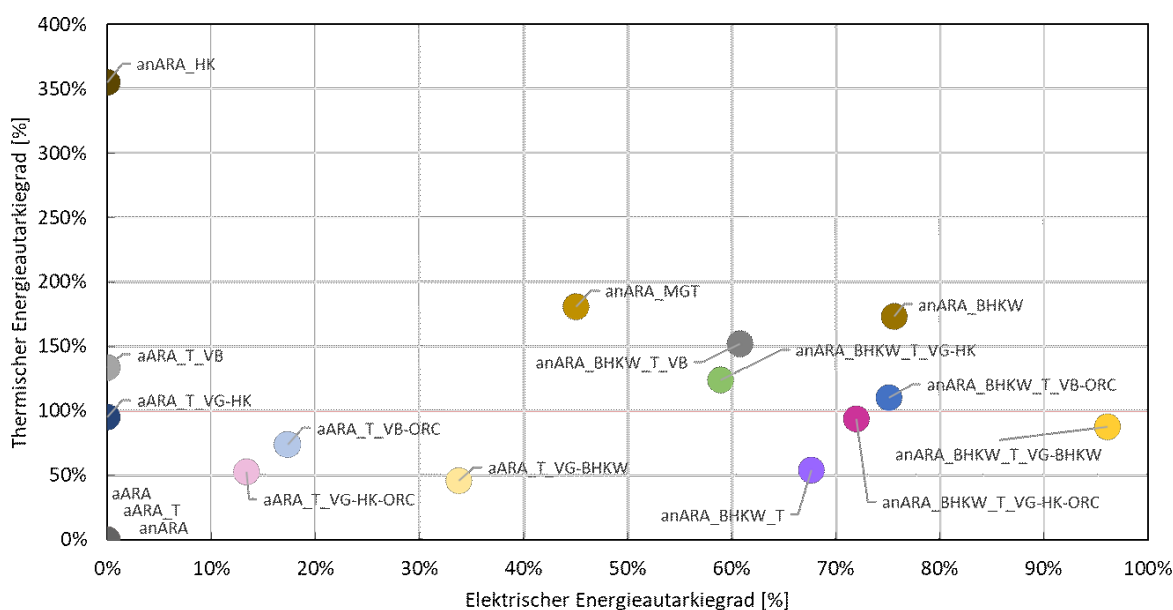


Abbildung 6-4: Elektrischer und thermischer EAG der Energieverbunde der GK5 (100.001 EW)

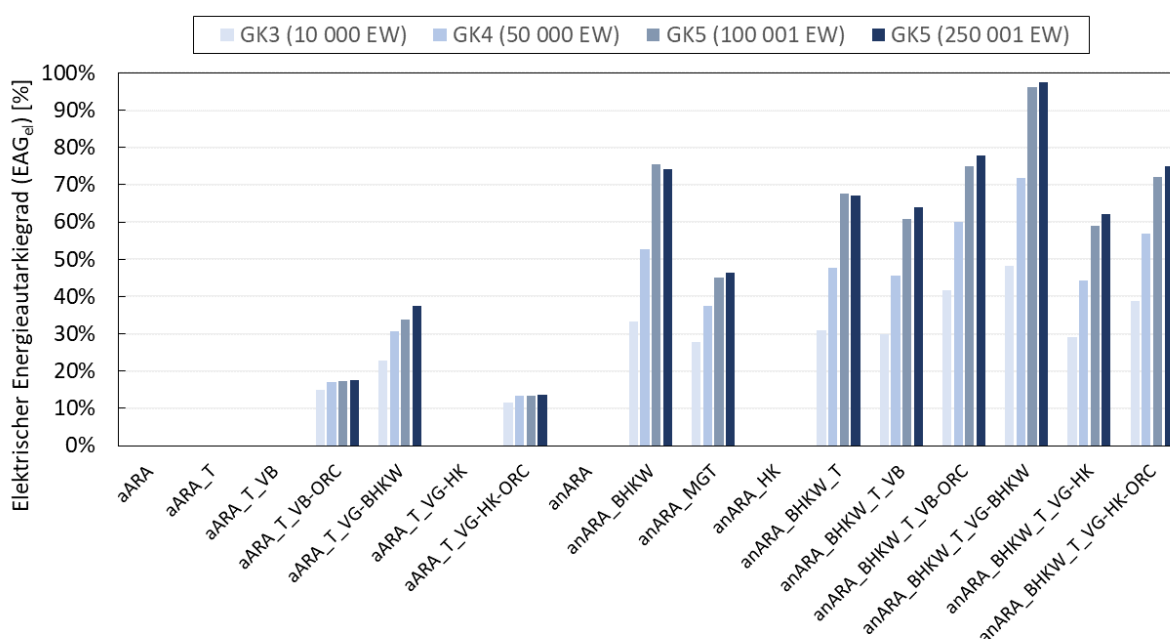
In Abbildung 6-4 erfolgt die Darstellung von Energieverbunden aerober Belebungsanlagen (1 – 7 gemäß Tabelle 6-1) in hellen und anaerober (8 – 17) in satten Farben. Konfigurationen ohne Energieaufbringungseinheiten (aARA, aARA\_T und anARA) weisen einen elektrischen und thermischen EAG von 0 % auf. Energieverbunde die nur thermische Energie über die Klärschlammverbrennung (VB) oder die Nutzung eines Heizkessels zur Gasverwertung (HK und VG-HK) generieren, zeigen einen  $EAG_{el}$  von 0 %, können aber hohe  $EAG_{th}$  von bis zu 355 % (anARA\_HK) erreichen. Generell niedrigere EAG sind bei Konfigurationen mit aerober Schlammstabilisierung (aARA) zu erkennen. Dies ist vor allem auf das Fehlen von Faulgas als Energieträger zurückzuführen. Die niedrigeren  $EAG_{el}$  sind zudem durch den Mehrbedarf an elektrischer Energie für die Belüftung im Belebungsbecken (siehe Kapitel 2.4.1) zu begründen. Energieverbunde mit anaerober Schlammstabilisierung (anARA) sind durch höhere EAG gekennzeichnet. Konfigurationen ohne Klärschlammnutzung, wie „anARA\_BHKW“ und „anARA\_BHKW\_T“ weisen hinsichtlich des  $EAG_{el}$  Werte von 76 % und 68 %, sowie hinsichtlich des  $EAG_{th}$  Werte von 174 % und 54 % auf. Hier lassen sich die reduzierten EAG von „anARA\_BHKW\_T“ durch den Energiebedarf des Trockners erklären. Der zusätzliche Energiebedarf kann mittels Integration eines Aggregates zur thermischen Klärschlammverwertung reduziert werden. Vor allem die Kombination von Faulgas- und Klärschlammverwertung kann bei integrierter Kraftwärmekopplung zu hohen elektrischen und thermischen EAG mit ausgeglichenem Verhältnis führen. Beispielsweise zeigt die Konfiguration „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ einen  $EAG_{el}$  von 96 % und einen  $EAG_{th}$  von 88 %.

Hier gilt zu beachten, dass die Energieverbunde 2 – 7 und 12 – 17, wie anfangs des Kapitels beschrieben, keinen Stand der Technik darstellen. Bei Betrachtung der Energieverbunde inklusive Klärschlammverwertung wird jedoch ersichtlich, dass diese trotz Integration eines zusätzlichen Trockneraggregates mit hohem elektrischem und thermischem Energiebedarf zu hohen  $EAG_{el}$  und  $EAG_{th}$  führen können. Beispielsweise erreicht der Energieverbund „aARA\_T\_VG-BHKW“ einen  $EAG_{el}$  von 34 % und einen  $EAG_{th}$  von 46 % bzw. zeigt der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ einen  $EAG_{el}$  von 96 % und einen  $EAG_{th}$  von 88 %. Da der Weg zu den energietechnisch optimierten Energieverbunden inkl. thermischer Klärschlammverwertung über die Integration einer Trocknung führt, könnten die Energieverbunde „aARA\_T“ und „anARA\_T“ kurz- bis mittelfristige Zielkonfigurationen sein. Trockneraggregate für Klärschlamm entsprechen dem Stand der Technik, womit eine Integration ein erreichbares kurz- bis mittelfristiges Ziel darstellen könnte. Die Integration eines Aggregates zur thermischen Schlammverwertung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einem höheren Zeit- und Investitionsaufwand verbunden, womit dieses Vorhaben ein langfristiges, zukünftiges Ziel darstellen könnte.



### 6.1.2.1 Identifikation von Energieverbunden mit hohem elektrischem Energieautarkiegrad für die Analysen 2 und 3

Um eine detaillierte Analyse der Auswirkungen einer Flexibilisierung auf die Betriebsweise der flexiblen Aggregate (siehe Kapitel 5.6.5.2) und die Kennzahlen eines Energieverbundes (siehe Kapitel 5.2) zu ermöglichen, werden die weiterführenden Analysen 2 und 3 zum theoretischen und realisierbaren Flexibilitätspotential auf der Basis von ausgewählten Energieverbunden durchgeführt. Die Auswahl der Energieverbunde erfolgt anhand des  $EAG_{el}$ , da die Bereitstellung von flexibler elektrischer Leistung für netz- und systemdienliche Zwecke im Fokus dieser Dissertation liegt. Um die Energieverbunde mit hohem  $EAG_{el}$  zu identifizieren, werden diese in Abbildung 6-5 für alle Energieverbunde und Größenklassen präsentiert.



**Abbildung 6-5: Elektrischer EAG der mit OPTIEVLEX analysierten Energieverbunde und Größenklassen**

Gemäß Abbildung 6-5 weist der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ den höchsten  $EAG_{el}$  auf. Dies ist auf den Einsatz von je einem BHKW für die thermische Faul- und Produktgasverwertung zurückzuführen. Wie in Kapitel 6.1.1.2 erläutert weist ein BHKW den höchsten elektrischen Wirkungsgrad der Gasnutzungsaggregate auf. Zudem stellen BHKWs insbesondere in Kombination mit Gasspeichern hinsichtlich der definierten Auswahlkriterien für flexible Aggregate (siehe Kapitel 5.6.5.2) eine Flexibilitätsoption dar. Der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ wird daher für eine detaillierte Analyse der zeitlich aufgelösten elektrischen Flexibilitätspotentiale ausgewählt. Dieser Energieverbund stellt, wie vorab erläutert, einen zukünftigen Energieverbund dar und ist nicht Stand der Technik. Um eine Vergleichbarkeit mit dem Stand der Technik zu ermöglichen, erfolgt zudem die Auswahl des Energieverbundes „anARA\_BHKW“. Dieser Energieverbund ist im deutschsprachigen Raum

weit verbreitet (siehe Kapitel 2.2) und wird im Energieverbund „anARA\_BHKW\_T“ mit einem Trockner erweitert. Dezentrale Trockner sind ebenfalls Stand der Technik, kommen aber nicht auf allen ARAs standartmäßig zum Einsatz (siehe Kapitel 2.3.1). Daher stellt dieser Energieverbund wie vorab beschrieben eine kurz- bis mittelfristig umsetzbare Option dar, welche als Vorstufe zum Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ gesehen werden kann. Für die Analysen 2 und 3 wird zudem eine Einschränkung auf die Ausbaupazität von 100.001 EW (GK5) vorgenommen, da wie bereits erwähnt die netz- und systemdienlichen Flexibilitätsszenarien hinsichtlich Regendaten und lokale Residuallasten auf Daten einer mittelgroßen Stadt mit einer Kläranlage von ungefähr dieser Ausbaupazität basieren.

## **6.2 Analyse 2: Theoretische Flexibilitätspotentiale ausgewählter energietechnisch optimierter Energieverbunde**

Die Analyse 2 dient der Ermittlung der zeitlich aufgelösten Jahreslast- und -aufbringungsprofile, sowie der zeitlich aufgelösten theoretischen Flexibilitätspotentiale der in Kapitel 6.1.2.1 ausgewählten energietechnisch optimierten Energieverbunde („anARA\_BHKW“, „anARA\_BHKW\_T“ und „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“). Dabei baut die Analyse 2 auf der Spezifikation der Energieverbunde gemäß Analyse 1 auf (siehe Kapitel 6.1.1). Die theoretischen Potentiale werden unter Annahme eines Trockenwetterzulaufes ermittelt und in Form von Flexibilitätsbändern (siehe Kapitel 5.6.5.3) dargestellt. Jahresregenprofile werden im Rahmen der Analyse 3 (siehe Kapitel 6.3) zur Ermittlung der realisierbaren Flexibilitätspotentiale der ausgewählten Energieverbunde berücksichtigt. Zur Schaffung einer ausreichenden Datenauflösung für die Analyse 3 wird ein Zeitschritt von 15 - Minuten gewählt. Aufgrund des Zieles der vorliegenden Dissertation, liegt nachfolgend der Fokus auf den elektrischen Leistungen, Energiemengen und Flexibilitätspotentialen.

### **6.2.1 Definition der Nutzerspezifikationen - Block „Modelltransformation“**

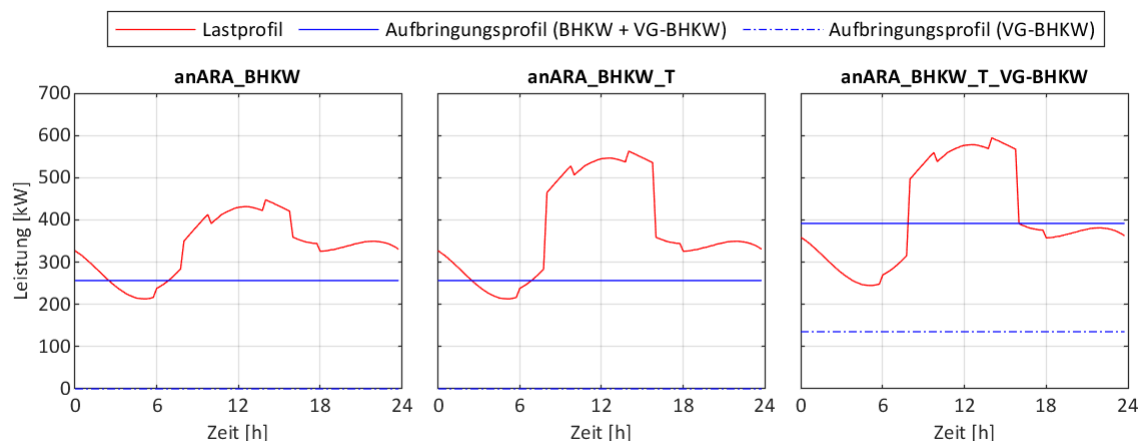
Die Definition der Volllaststunden der energieintensiven Aggregate der in den Energieverbunden „anARA\_BHKW“, „anARA\_BHKW\_T“ und „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ integrierten Module erfolgte bereits im Rahmen der Analyse 1 (siehe Kapitel 6.1.1.1 bis 6.1.1.3). Die Volllaststunden stellen die Grundlage zur Auswahl der in OPTIEVLEX verfügbaren Betriebsoptionen nach Tabelle 10-39 dar. Tabelle 6-3 zeigt die gewählte Option je Aggregat. Das Zulaufpumpwerk wird kontinuierlich angepasst an das Zulaufprofil betrieben. Der Rechen, sowie die Rechengut- und Sandwaschanlage werden zwei Stunden vor- und nachmittags zugeschaltet. Das Sandfanggebläse hingegen läuft zur Einhaltung des Absetzgrades durchgehend mit konstanter Leistung. Die Aggregate der biologischen Reinigung beeinflussen maßgebend die Reinigungsleistung und werden daher kontinuierlich nach der CSB-Zulaufkonzentration des Belebungsbeckens betrieben. Die Orientierung an der CSB-

Konzentration führt zu einer Erhöhung der Aggregatleistung bei Erhöhung der Konzentration, um einen ausreichenden Abbau gewährleisten zu können. Die Aggregate der Schlammbehandlung werden jeweils durchgehend 12 h bzw. 8 h während der Betriebszeiten zugeschaltet. Dies ermöglicht ein Eingreifen bei technischen Problemen. Um eine der Literatur entsprechende installierte elektrische Nennleistung der GK 5 bei dem Faulgas-BHKW zu erreichen, wird eine Auslastung von 50 % vorgenommen. Hier ergibt sich eine Nennleistung von 540 kW. [11] Die fünfzigprozentige Auslastung wird für das Produktgas-BHKW übernommen, welches damit eine Nennleistung von 280 kW aufweist.

**Tabelle 6-3: Spezifikation des Betriebsverhaltens energieintensiver Aggregate für die mit OPTIEVLEX durchgeführten Analysen**

Aggregat	Option	Betriebsverhalten auf Basis der Volllaststunden
Zulaufpumpwerk	1	Dauerbetrieb
Rechen inkl. Waschanlage	1	On: 8-10 und 14-16 Uhr
Sandfanggebläse	1	Dauerbetrieb konstant
Sandwaschanlage	2	On: 8-10 und 14-16 Uhr
Belüftung	3	Dauerbetrieb nach CSB-Konzentration
Umwälzung	3	Dauerbetrieb nach CSB-Konzentration
Rezirkulation	3	Dauerbetrieb nach CSB-Konzentration
Rücklaufschlammpumpe	3	Dauerbetrieb nach CSB-Konzentration
Eindicker	2	On: 6-18 Uhr
Entwässerung	2	On: 8-16 Uhr
Trockner	2	On: 8-16 Uhr
Energieaufbringungseinheiten	2	Auslastung 50%

### 6.2.2 Analyseergebnisse: Elektrische Jahreslast- und -aufbringungsprofile ausgewählter energietechnisch optimierter Energieverbunde



**Abbildung 6-6: Mittlere elektrische Trockenwetter-Tageslast- und -aufbringungsprofile der ausgewählten Energieverbunde „anARA\_BHKW“, „anARA\_BHKW\_T“ und „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“**

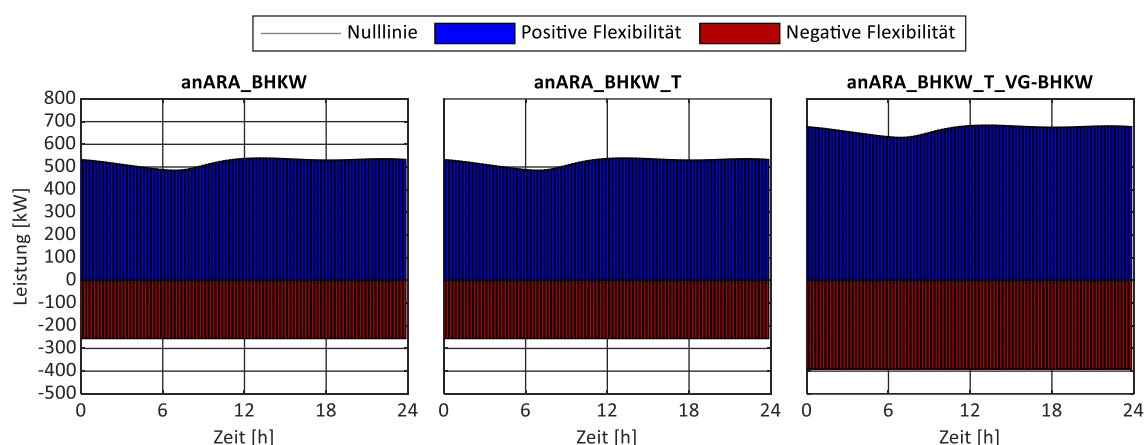
Die Analyse der Profilcharakteristika erfolgt anhand eines mittleren Tages, da der elektrische Jahreslastgang keine ausgeprägten Abhängigkeiten von den Jahreszeiten zeigt. Dies ist auf das übers Jahr konstante Tagesprofil gemäß dem Trockenwetterzulaufmodell zurückzuführen (siehe Kapitel 5.6.3). Lediglich die Energieaufbringungsprofile zeigen geringe Abhängigkeiten. So liegt das Aufbringungsprofil des Faulgas-BHKWs bei allen Energieverbunden im Winter rund 3 % unter und im Sommer rund 3 % über dem Jahresdurchschnitt. Dies ergibt sich aufgrund einer zunehmenden Aktivität der Mikroorganismen bei steigenden Temperaturen und damit einem leicht erhöhtem Schlamm- und Faulgasanfall in Jahreszeiten mit höheren Belebungsbecken- und Außentemperaturen (siehe Tabelle 5-5). Da die erhöhte Aktivität den ausgefaulten Nutzschlamm reduziert, führt dies zu einer gegenläufigen Situation beim Aufbringungsprofil des Produktgas-BHKWs. [12] Hier kommt es im Vergleich zum Jahresdurchschnitt zu einer rund dreiprozentigen Reduktion im Sommer bzw. Erhöhung im Winter.

Abbildung 6-6 zeigt die jährlichen mittleren elektrischen Tageslast- und -aufbringungsprofile der in Analyse 1 ausgewählten Energieverbunde „anARA\_BHKW“, „anARA\_BHKW\_T“ und „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“. Die Lastprofile nähern sich aufgrund des Betriebsverhaltens der biologischen Stufe und deren Anteil am Gesamtverbrauch ( $\approx 53\%$ ) an den Verlauf der CSB-Zulaufkonzentration zum Belebungsbecken an. Das Lastprofil zeigt zudem jeweils zwei Höcker, welche auf das Betriebsverhalten der Rechen, sowie der Rechengut- und Sandwaschanlage zurückzuführen sind. Der Anstieg der Leistung bei 6 h, sowie der Abfall bei 18 h ist dem Eindicker zuzurechnen. Zudem erhöht sich die Leistung in den Stunden 8 – 16 durch das Betriebsverhalten der Entwässerung. Der Energieverbund „anARA\_BHKW“ weist einen minimalen und maximalen Leistungsbedarf von  $210 \text{ kW}_{\text{el}}$  und  $450 \text{ kW}_{\text{el}}$  auf. Bei Betrachtung des Lastprofils des Energieverbundes „anARA\_BHKW\_T“ ist eine Erhöhung der Leistung in den Stunden 8 – 16 erkennbar, welche durch die Klärschlamm-trocknung verursacht wird. Hier tritt ein erhöhter maximaler Leistungsbedarf von rund  $560 \text{ kW}_{\text{el}}$  auf. Das Lastprofil des Energieverbundes „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ zeigt eine durchgehende Erhöhung der Leistung, welche durch den Eigenverbrauch des integrierten Vergasungsprozesses begründet ist. Dabei erhöht sich die minimale und maximale Leistung auf rund  $250 \text{ kW}_{\text{el}}$  und  $590 \text{ kW}_{\text{el}}$ .

Die Anlagekonfigurationen „anARA\_BHKW“ und „anARA\_BHKW\_T“ beinhalten keine Aggregate zur thermischen Klärschlammverwertung, womit das Aufbringungsprofil nur die Leistung des Faulgas-BHKWs widerspiegelt. Hier sind Leistungen von rund  $260 \text{ kW}_{\text{el}}$  ersichtlich. Der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ beinhaltet eine Klärschlammnutzung mittels Vergaser und anschließender Verwertung des Produktgases in einem BHKW. Daher liegt ein zusätzliches Aufbringungsprofil für das Produktgas-BHKW vor. Die zusätzliche Leistung von ca.  $135 \text{ kW}_{\text{el}}$  führt zu einer gesamten aufgebrauchten Leistung von rund  $390 \text{ kW}_{\text{el}}$ .

### 6.2.3 Analyseergebnisse: Zeitlich aufgelöstes theoretisches Flexibilitätspotential ausgewählter energietechnisch optimierter Energieverbunde

Das zeitlich aufgelöste theoretische Flexibilitätspotential wird auf Basis der zeitlich aufgelösten Jahreslast- und -aufbringungsprofile der flexiblen Aggregate ermittelt. Die Vorgehensweise ist in Kapitel 5.6.5.2 beschrieben. Die theoretischen Flexibilitätspotentiale werden in Form von Flexibilitätsbändern dargestellt. Wie in Kapitel 5.6.5.3 erläutert bildet ein Flexibilitätsband das theoretische positive und negative Flexibilitätspotential je Zeitschritt im jährlichen mittleren Tagesverlaufs ab. Die Betrachtung eines mittleren Tages ist, wie im Zuge der Jahreslast- und -aufbringungsprofile erläutert, aufgrund des zugrundeliegenden Trockenwetterzulaufmodells möglich. Die Flexibilitätsbänder der in Analyse 1 ausgewählten Energieverbunde „anARA\_BHKW“, „anARA\_BHKW\_T“ und „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ sind in Abbildung 6-7 ersichtlich.



**Abbildung 6-7: Theoretisches elektrisches Flexibilitätspotential – Zeitlich aufgelöste Flexibilitätsbänder der ausgewählten Energieverbunde „anARA\_BHKW“, „anARA\_BHKW\_T“ und „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“**

Nach Abbildung 6-7 verfügen die Energieverbunde „anARA\_BHKW“ und „anARA\_BHKW\_T“ über ein analoges Flexibilitätsband. Dies ist darauf zurückzuführen, dass beide Energieverbunde dieselben flexiblen Aggregate zur Bereitstellung von Flexibilität heranziehen. Die flexiblen Lasten, Sandfanggebläse, Belüftung, Umwälzung, Rezirkulation und Rücklaufschlammpumpe, stellen bei einer Abschaltung einen Großteil der positiven Flexibilität bereit. Da das Faulgas-BHKW gemäß der Spezifikation des Betriebsverhaltens nur zu 50 % ausgelastet ist, ergeben sich weitere positive Flexibilitäten aus einem Hochfahren auf Nennlast. Die negative Flexibilität basiert auf der vollständigen Abschaltung des Faulgas-BHKWs. Das Flexibilitätsband des Energieverbundes „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ beinhaltet das zusätzliche Flexibilitätspotential des Produktgas-BHKWs. Analog zum Faulgas-BHKW wird eine fünfzigprozentige Auslastung angenommen, womit positive Flexibilität über das Hochfahren auf Nennlast und negative Flexibilität mittels Abschaltung bereitgestellt werden kann. Details zu den flexiblen Leistungen einzelner Aggregate sind in Tabelle 6-4 ersichtlich.

**Tabelle 6-4: Theoretisches elektrisches Flexibilitätspotential – Minimale, maximale und durchschnittliche positive und negative flexible Leistung gemäß Flexibilitätsband nach Aggregaten und Energieverbunden**

Flexible Aggregate je Energieverbund	Positive Flexibilität			Negative Flexibilität		
	min [kW <sub>el</sub> ]	max [kW <sub>el</sub> ]	∅ [kW <sub>el</sub> ]	min [kW <sub>el</sub> ]	max [kW <sub>el</sub> ]	∅ [kW <sub>el</sub> ]
Zulaufpumpwerk	20,13	42,84	33,51	0,00	0,00	0,00
Sandfanggebläse	11,99	11,99	11,99	0,00	0,00	0,00
Belüftung	131,96	168,10	156,55	0,00	0,00	0,00
Rezirkulation	13,11	16,03	15,28	0,00	0,00	0,00
Rücklaufschlammpumpe	17,26	23,88	21,38	0,00	0,00	0,00
Faulgas-BHKW	260,02	296,67	283,56	-243,33	-270,98	-256,44
<b>Summe Energieverbunde anARA_BHKW und anARA_BHKW_T</b>	<b>454,47</b>	<b>559,51</b>	<b>522,27</b>	<b>-243,33</b>	<b>-270,98</b>	<b>-256,44</b>
Produktgas-BHKW	135,01	150,28	144,79	-129,72	-140,00	-135,21
<b>Summe Energieverbund anARA_BHKW_T_VG-BHKW</b>	<b>589,48</b>	<b>709,79</b>	<b>667,06</b>	<b>-373,05</b>	<b>-410,98</b>	<b>-391,65</b>

Die Aufstellung in Tabelle 6-4 zeigt, dass die flexiblen Lasten des Reinigungsprozesses (Zulaufpumpwerk, Sandfanggebläse, Belüftung, Rezirkulation und Rücklaufschlammpumpe) aufgrund des angenommenen kontinuierlichen Betriebsverhaltens keine negative Flexibilität bereitstellen können. Eine Erhöhung der Leistung dieser Einheiten ist auch gemäß Literatur [11–14] aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll oder aufgrund der Auslastung nicht möglich. Die dezentralen (ARA-internen) Energieaufbringungseinheiten können positive und negative Flexibilität liefern. Zudem wird in Kombination mit Abbildung 6-7 ersichtlich, dass die Flexibilitäten Schwankungen im Tages- bzw. Jahresverlauf aufweisen. Das Zulaufpumpwerk ist in Abhängigkeit von der Zulaufmenge zu betrachten und ist durch Tagesschwankungen gekennzeichnet. Das Sandfanggebläse zeigt keine Schwankungen, da weder Temperatur- noch Zulaufschwankungen gemäß OPTIEVLEX zu einer Leistungsänderung führen. Die Leistungen der Belüftung, Rezirkulation und Rücklaufschlammumpen sind von der CSB-Zulaufkonzentration und der Belebungsbeckentemperatur abhängig, was sowohl mit Schwankungen im Tages- als auch im Jahresverlauf verbunden ist. Die Flexibilitäten der Energieaufbringungseinheiten weisen eine jahreszeitliche Schwankung auf, welche mit der Änderung des Schlammanfalles bei Erhöhung der Belebungsbeckentemperatur zusammenhängt.

Die Flexibilitätsbänder und die daraus abgeleiteten flexiblen Leistungen bieten eine Abschätzung des theoretischen Flexibilitätspotentials eines spezifischen Energieverbundes. Die gewonnenen Erkenntnisse können zur Planung eines Flexibilitätseinsatzes bzw. zur Abschätzung des leistbaren Beitrages als Flexibilitätsdienstleister innerhalb einer Energiegemeinschaft herangezogen werden (siehe Kapitel 6.3.3.1). Hier gilt jedoch zu beachten, dass die Bänder, wie in Kapitel 5.6.5.3 erläutert, keine Regenerationszeiten, maximale Zu- oder Abschaltdauern, sowie An- und Abfahrtszeiten berücksichtigen. Das realisierbare Flexibilitätspotential ist daher geringer anzusetzen. Die Analyse des realisierbaren Potentials wird in den nachfolgenden Unterkapiteln anhand netz- und systemdienlicher Flexibilitätsszenarien durchgeführt.

### 6.3 Analyse 3 und 4: Realisierbare Flexibilitätspotentiale ausgewählter energietechnisch optimierter Energieverbunde in netz- und systemdienlichen Szenarien

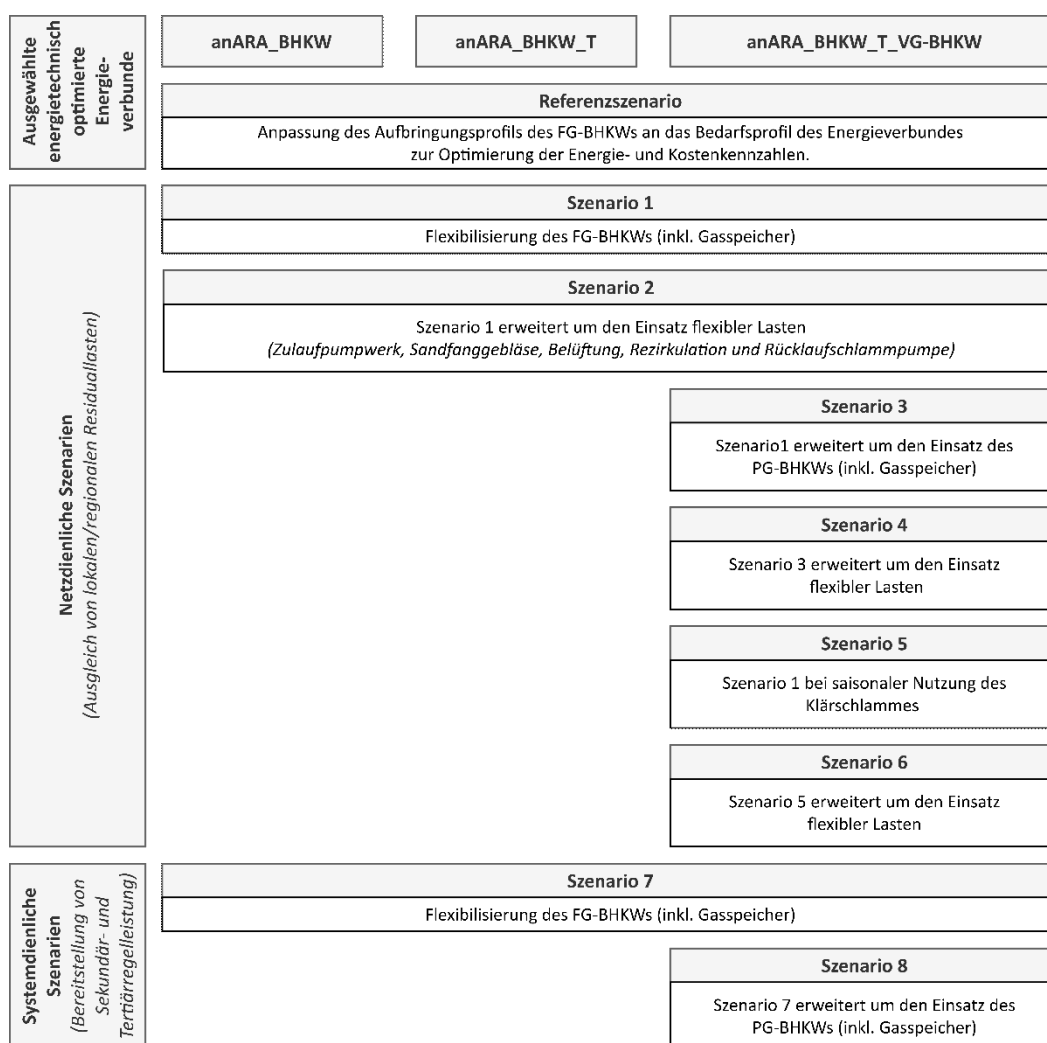


Abbildung 6-8: Mit OPTIEVLEX untersuchte netz- und systemdienliche Szenarien nach den ausgewählten Energieverbunden „anARA\_BHKW“, „anARA\_BHKW\_T“ und „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“

Wie in Kapitel 5.7 erläutert, beeinflussen externe und interne Parameter das realisierbare Flexibilitätspotential eines Energieverbundes. Besonders hervorzuheben sind Regenerereignisse (extern), der netz- und systemdienliche Flexibilitätsbedarf (extern), maximale Abschalt Dauern und Regenerationszeiten der flexiblen Aggregate (intern), sowie Speicherkapazitäten für Faul- und Produktgas, bzw. Klärschlamm (intern). Im Rahmen der Analysen 3 und 4 werden diverse Parameterausprägungen bzw. -kombinationen in netz- und systemdienlichen Flexibilitätsszenarien (siehe Abbildung 5-36) mit OPTIEVLEX untersucht. Die Szenarien bilden verschiedene Kombinationen von flexiblen Aggregaten ab und dienen dazu die Kennzahlen nach Kapitel 5.2 bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen zu ermitteln. Für die Analysen 3 und 4 werden je ausgewähltem energietechnisch optimierten Energieverbund (anARA\_BHKW, anARA\_BHKW\_T und anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW) alle durchführbaren Szenarien berechnet. Die untersuchten Szenarien je Energieverbund sind in Abbildung 6-8 ersichtlich. Das Referenzszenario bildet den Ausgangszustand ohne Flexibilisierungsmaßnahmen ab und stellt das Vergleichsszenario dar. Für die Energieverbunde „anARA\_BHKW“ und „anARA\_BHKW\_T“ werden die Szenarien 1, 2 und 7 berechnet. Die restlichen Szenarien sind aufgrund eines fehlenden Klärschlamm-Verwertungskonzeptes nicht durchführbar. Da der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ eine thermische Verwertung des Klärschlammes mittels Vergaser und eine anschließende Nutzung des Produktgases mittels Blockheizkraftwerk beinhaltet, werden für diesen Energieverbund alle Szenarien analysiert. Die dafür definierten Systemgrenzen, erforderlichen Nutzerspezifikationen, sowie die daraus resultierenden Ergebnisse werden in den nachfolgenden Unterkapiteln präsentiert.

### 6.3.1 Definition der Systemgrenzen

Die Systemgrenzen des Steady-State-Teilmodells 2 (siehe Kapitel 5.7.1) werden auf die Analysen 3 und 4 übertragen. Die Systemgrenzen für die netzdienlichen Szenarien in Analyse 3 sind in Abbildung 6-9 grafisch dargestellt.

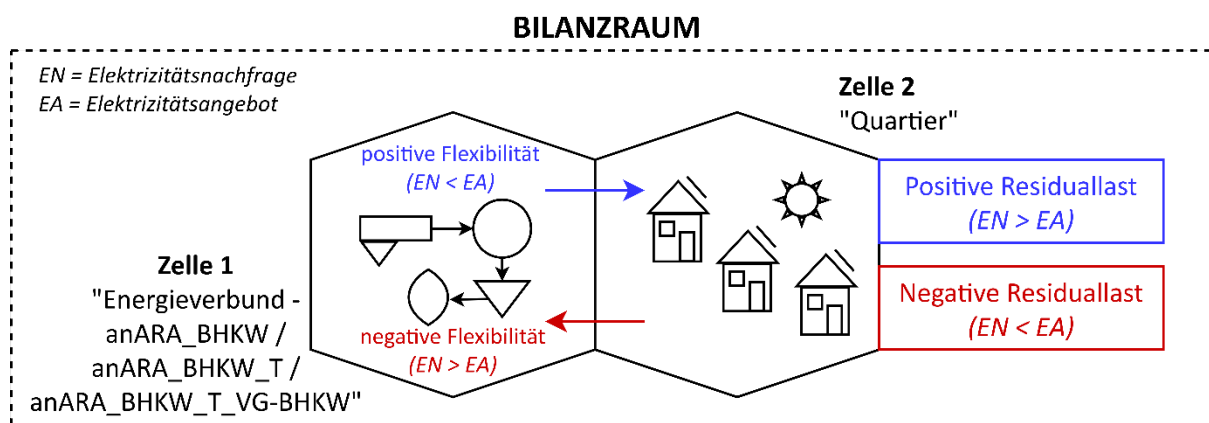


Abbildung 6-9: Systemgrenzen für die netzdienlichen Szenarien in Analyse 3



Wie bereits in Kapitel 5.7.1 erläutert, ist für die netzdienlichen Szenarien das Jahresbedarfsprofil an netzdienlicher Flexibilität (= Residuallast) eines spezifischen Quartiers eines Stadtgebietes erforderlich. Die Systemgrenze umfasst daher gemäß Abbildung 6-9 zwei Zellen (siehe auch Abbildung 5-31). Zelle 1 repräsentiert die energietechnisch optimierten Energieverbunde „anARA\_BHKW“, „anARA\_BHKW\_T“ bzw. „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“, während Zelle 2 die Residuallast gemäß Formel (3-1) des Quartiers abbildet. Zelle 1 und 2 stellen somit eine „regionale Erneuerbare-Energiegemeinschaft“ gemäß dem Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes [5] dar. Da sich die Spezifikation der Energieverbunde (siehe Kapitel 6.1.1) an einer realen kommunalen ARA einer mittelgroßen österreichischen Stadt mit rund 25.000 Einwohnern orientiert, werden die örtlichen Grenzen des realen Stadtgebietes für die Auswahl des Quartiers und die Berechnung dessen Residuallast, sowie für die Ermittlung der Regenspenden herangezogen. Zur Abgrenzung des Quartiers im Stadtgebiet und Berechnung dessen Residuallast findet der zellulare Ansatz gemäß Vopava et al. [139], sowie die damit örtlich aufgelösten Daten der mittelgroßen Stadt Anwendung. Dabei wird die Stadt in örtliche Zellen (=Stadtgebiete) eingeteilt, für welche jeweils eine Aggregation der Last-, Aufbringungs- und Speicher-Standardlastprofile vorgenommen wird. Die Aufbringungsprofile beinhalten die erneuerbare Elektrizitätsaufbringung, womit die elektrische Residuallast je Stadtgebiet ermittelt werden kann. Zudem kann die Residuallast der gesamten Stadt berechnet werden. Bei Betrachtung des theoretischen positiven und negativen Flexibilitätspotentials von rund  $450 \text{ kW}_{\text{el}}$  bis  $710 \text{ kW}_{\text{el}}$  und ca.  $-240 \text{ kW}_{\text{el}}$  bis  $-410 \text{ kW}_{\text{el}}$  wird deutlich, dass die Residuallast der gesamten Stadt mit maximalen positiven und negativen Residuallasten von  $35 \text{ MW}_{\text{el}}$  und  $-15 \text{ MW}_{\text{el}}$  nicht ausreichend ausgeglichen werden kann.

Daher werden zur Auswahl des Quartiers die Residuallasten von den fünf Stadtgebieten (Stadtgebiet 2 – 6), die gemäß Vopava et al. [139] an das Stadtgebiet mit der realen kommunalen ARA (Stadtgebiete 1) angrenzen, näher untersucht. Die örtlich angrenzenden Stadtgebiete werden analysiert, da so eine durch die Residuallast ausgelöste regionale Über- oder Unterversorgung direkt im regionalen Netz ausgeglichen werden kann. Die fünf Stadtgebiete bilden ca. 12 % des städtischen Verbrauches, sowie der städtischen Residuallast ab. Die detaillierten Anteile je Stadtgebiet sind in Tabelle 10-40 (S.237) aufgelistet. Zudem ist die Struktur der Stadtgebiete 2 – 6 nach Standardlastprofilen in Tabelle 10-41 (S.237) ersichtlich. Details zu den Residuallasten der fünf Stadtgebiete, welche das Jahresbedarfsprofil an netzdienlicher Flexibilität abbilden, und zur Auswahl des Quartiers werden in Kapitel 6.3.3.1 erläutert.

Für die systemdienlichen Szenarien in Analyse 4 werden die Systemgrenzen gemäß Kapitel 5.7.1 übernommen. Details zum Jahresbedarfsprofil an systemdienlicher Flexibilität sind im Kapitel 6.3.3.2 nachlesbar.

### 6.3.2 Definition der Nutzerspezifikationen - Block „Regenauswertung“

Die Basis für alle Szenarioanalysen stellt eine 15-minütig aufgelöste Jahressimulation unter Berücksichtigung von Regenereignissen dar. Hier werden, wie vorab erwähnt, die Daten zur Regenspende einer mittelgroßen österreichischen Stadt des Jahres 2014 herangezogen. Das integrierte Jahresregenzulaufprofil ist in Abbildung 6-10 dargestellt.

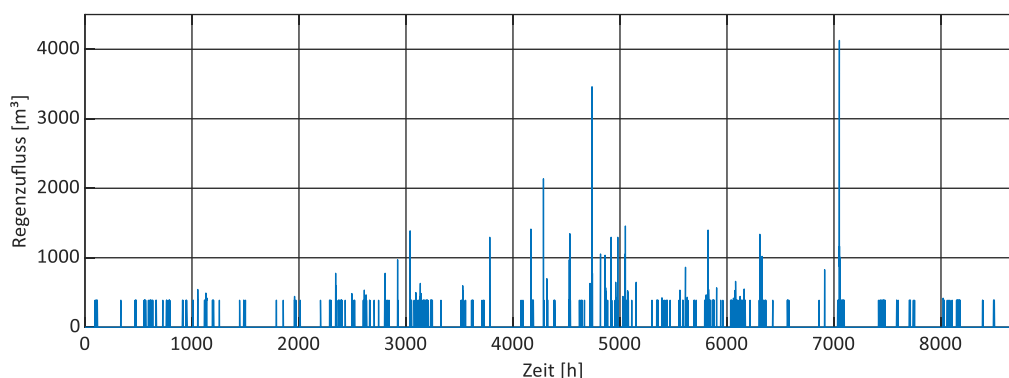


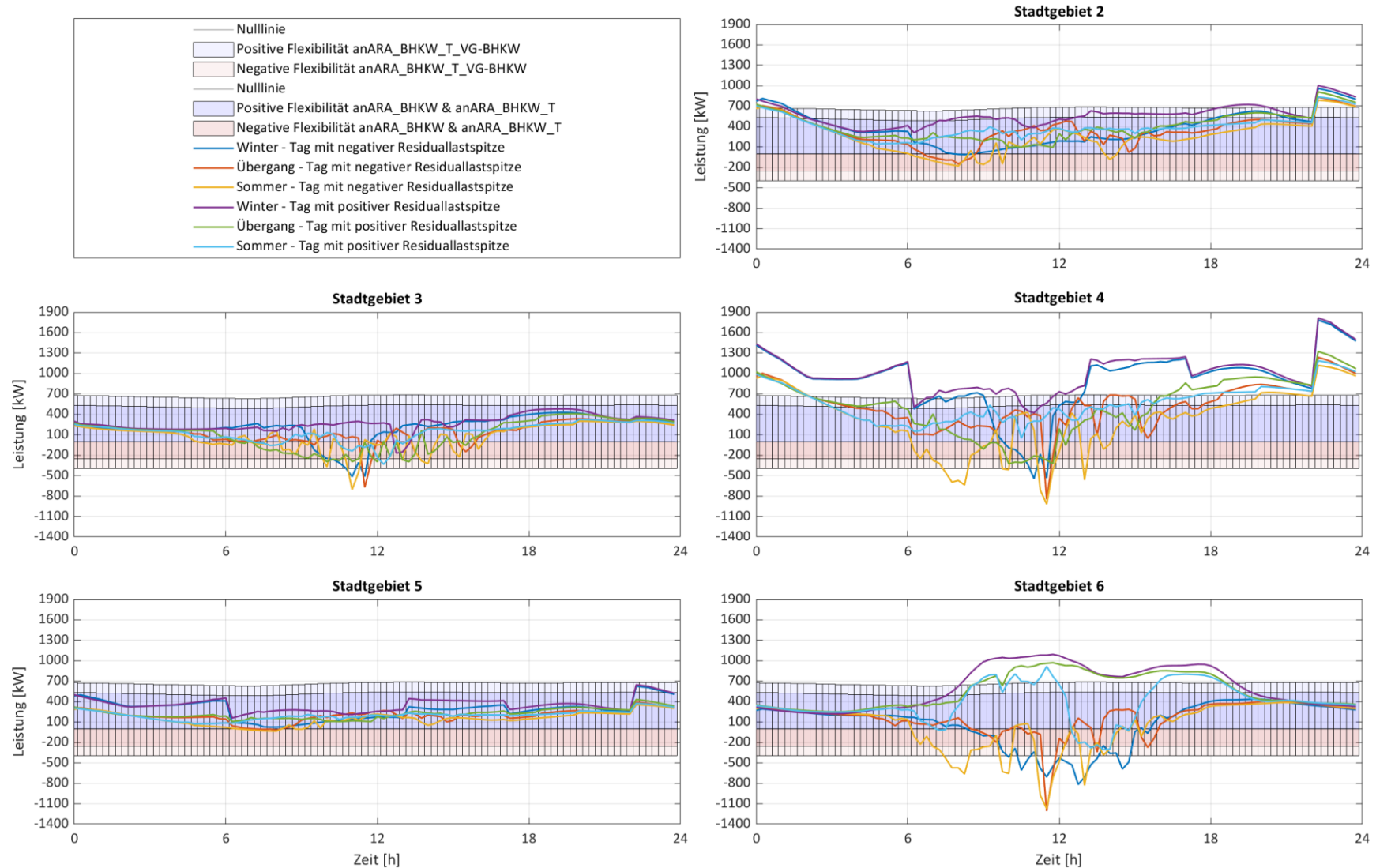
Abbildung 6-10: Jahresregenzulaufprofil für die mit OPTIEVLEX durchgeführten Analysen 3 und 4

### 6.3.3 Definition der Nutzerspezifikationen - Block „Abrufmodell“

Details zu den Jahresbedarfsprofilen sind den nachfolgenden Unterkapiteln zu entnehmen.

#### 6.3.3.1 Jahresbedarfsprofil an netzdienlicher Flexibilität

Gemäß Kapitel 6.3.1, werden zur Auswahl des städtischen Quartiers, die Residuallasten von den fünf Stadtgebieten (Stadtgebiet 2 – 6), die an das Stadtgebiet mit der realen kommunalen ARA (Stadtgebiet 1) angrenzen, herangezogen. Ziel ist die Auswahl eines Stadtgebietes bzw. einer Kombination aus Stadtgebieten, deren Residuallast das Jahresbedarfsprofil an netzdienlicher Flexibilität des Quartiers widerspiegelt. Die Residuallasten bilden jeweils das Jahr 2030 mit erhöhter Photovoltaik (PV)-Einspeisung ab und werden auf Basis des Lastprofils der mittelgroßen Stadt des Jahres 2014 mit dem zellularen Ansatz gemäß Vopava et al. [139] ermittelt. Die PV-Einspeisung liegt in Form eines maximalen Potentials bei hundertprozentiger Dachflächennutzung vor, welches je nach Untersuchungsziel angepasst werden kann. Den nachfolgenden Analyseschritten liegt eine Potentialausnutzung von 25 % zugrunde. Dies ist auf die Ziele des Regierungsprogrammes 2020-2024 [4] und des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes [5] zurückzuführen, da die angestrebte PV-Kapazität von 12 TWh<sub>el</sub> rund 24 % des maximalen technischen Potentials (ca. 50 TWh<sub>el</sub> [136]) entspricht. Zur Auswahl eines Stadtgebietes bzw. einer Kombination werden ausgewählte Tagesprofile der Residuallasten der fünf Stadtgebiete in Abbildung 6-11 in Zusammenhang mit den Flexibilitätsbändern der Energieverbunde „anARA\_BHKW“, „anARA\_BHKW\_T“ und „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ dargestellt. Die ausgewählten Tagesprofile bilden die Tage mit der positiven bzw. negativen Residuallastspitze je Saison (Winter, Übergang (= Frühling und Herbst) und Sommer) ab.



**Abbildung 6-11: Gegenüberstellung ausgewählter Tagesprofile nach Saisonen der Residuallasten der Stadtgebiete 2 – 6 (Zelle 2) mit den Flexibilitätsbändern der Energieverbunde „anARA\_BHKW“, „anARA\_BHKW\_T“ und „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ (Zelle 1)**

In Abbildung 6-11 wird das Flexibilitätsband herangezogen, um im Vergleich mit den Residuallastprofilen abschätzen zu können, ob das theoretische Flexibilitätspotential des jeweiligen Energieverbundes im Tagesverlauf eine ähnliche Größenordnung aufweist wie die Residuallast des jeweiligen Stadtgebietes. Das Stadtgebiet 3 und 5 zeigen in den meisten 15 min-Zeitschritten eine Deckung der mittleren theoretischen Potentiale der Energieverbunde und der auftretenden Residuallast. Im Stadtgebiet 3 übersteigen die negativen Residuallastspitzen in nur 14 Zeitschritten das Flexibilitätsband der Energieverbunde „anARA\_BHKW“ und „anARA\_BHKW\_T“, sowie in 5 Zeitschritten das Flexibilitätsband des Energieverbundes „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“. Im Stadtgebiet 5 überschreiten die Residuallasten in lediglich 7 Zeitschritten das Flexibilitätsband der Energieverbunde „anARA\_BHKW“ und „anARA\_BHKW\_T“. In den restlichen Zeitschritten erscheint ein Ausgleich als möglich. In den Stadtgebieten 2, 4 und 6 treten höhere positive und/oder negative Residuallastspitzen auf. Zudem liegen deutlich mehr Zeitschritte mit Überschreitung des theoretischen Potentials vor. Beispielsweise ist im Stadtgebiet 4 die Residuallast im Winter in 94 Zeitschritten höher als das theoretische Potential. Die Stadtgebiete 2, 4 und 6 werden daher nicht für die weiteren netzdienlichen Analysen als Quartier ausgewählt. Um in der Analyse 3 sowohl die Bereitstellung positiver als auch negativer Flexibilität untersuchen zu können, wird ein Jahresbedarfsprofil benötigt, welches in allen Saisonen positive und negative Residuallasten aufweist, womit auch das Stadtgebiet 5 nicht als Quartier festgelegt wird. Das Stadtgebiet 3 wird daher ausgewählt und nachfolgend als „Zelle 2“ bzw. „Quartier“ bezeichnet.

### *6.3.3.2 Jahresbedarfsprofil an systemdienlicher Flexibilität*

Im Rahmen der systemdienlichen Szenarien dienen die 15-Minuten-Werte der für die Regelzone APG abgerufenen Sekundär- und Tertiärregelleistungen von AT-Anbietern der Jahre 2014-2018 als Jahresbedarfsprofil [109]. Detaillierte Informationen hierzu können dem Kapitel 5.7.3 entnommen werden.

### **6.3.4 Definition der Nutzerspezifikationen - Block „Flexibilitätseinsatzmodell“**

Um die Bandbreite des realisierbaren Flexibilitätspotentials je nach Definition der Nutzerspezifikationen aufzuzeigen, wird ein Vergleich von zwei Flexibilisierungsstrategien je Szenario vorgenommen. Die Spezifikationen erfolgen hinsichtlich der verfügbaren Speicherkapazitäten und der maximalen Abschaltdauern der flexiblen Aggregate, welche der Tabelle 6-5 zu entnehmen sind.

**Tabelle 6-5: Definition der Nutzerspezifikationen des Blocks „Flexibilitätseinsatzmodells“ für die mit OPTIEVLEX durchgeführten Analysen**

Nutzerspezifikation	Einheit	Flexibilisierungsstrategie	
		FS1	FS2
Faulgasspeichervolumen	Nm <sup>3</sup>	900	Max
Produktgasspeichervolumen	Nm <sup>3</sup>	2800	Max
Maximale Abschaltdauer			
<i>Zulaufpumpwerk</i>	min	15	30
<i>Sandfanggebläse</i>	min	15	60
<i>Belüftung</i>	min	15	60
<i>Rezirkulation</i>	min	15	120
<i>Rücklaufschlammpumpe</i>	min	15	120
Produktgas-BHKW-Jahreszeit (Szenario 5 und 6)		Winter	Sommer

Die „Flexibilisierungsstrategie 1“ (FS1) bildet eine zurückhaltende Strategie ab, welche das Ziel verfolgt die flexiblen Lasten des Reinigungsprozesses jeweils nur kurz abzuschalten und den elektrischen Energieautarkiegrad des Energieverbundes geringstmöglich zu beeinflussen. Hier liegt daher die maximale Abschaltdauer der flexiblen Aggregate bei 15 Minuten, wobei eine Abschaltung nur bei Zuflussmengen die unter dem mittleren stündlichen Trockenwetterzufluss von rund 1.170 m<sup>3</sup> liegen stattfindet. Zudem orientiert sich daher die Elektrizitätsaufbringung in jedem Zeitschritt am Elektrizitätsbedarf des Energieverbundes, womit ein Hochfahren der Energieaufbringungseinheiten über den Bedarf hinaus nicht durchgeführt wird. Die Speichergrößen entsprechen dem Stand der Technik und spiegeln gemäß Schäfer et al. [11] 36 % der täglichen Gasproduktion wider. Zudem wird angenommen, dass Pufferkapazitäten der Pumpen aufgrund der kurzen Abschaltzeiten nicht ausgelastet werden, womit die Regenerationszeiten zum Abpumpen aufgestauter Fluide ausreichen. In den Szenarien 5 und 6 wird das Produktgas-BHKW zur Untersuchung saisonaler Speichereffekte im Winter betrieben.

Die „Flexibilisierungsstrategie 2“ (FS2) stellt eine offensive Strategie dar, welche das Ziel verfolgt eine möglichst hohe flexible Energiemenge bereitzustellen. Die Abschaltdauer entspricht dem jeweils maximal möglichen Zeitraum und eine Abschaltung ist bei Trockenwetterzufluss jederzeit möglich. Die Speicherkapazität wird nicht beschränkt, was die Ermittlung des maximalen Speicherbedarfes ermöglicht. Zudem wird angenommen, dass ausreichend Pufferkapazitäten für die Pumpen vorhanden sind. In den Szenarien 5 und 6 wird das Produktgas-BHKW im Sommer betrieben in welchem gemäß Abbildung 6-11 die höchsten negativen Residuallasten auftreten.

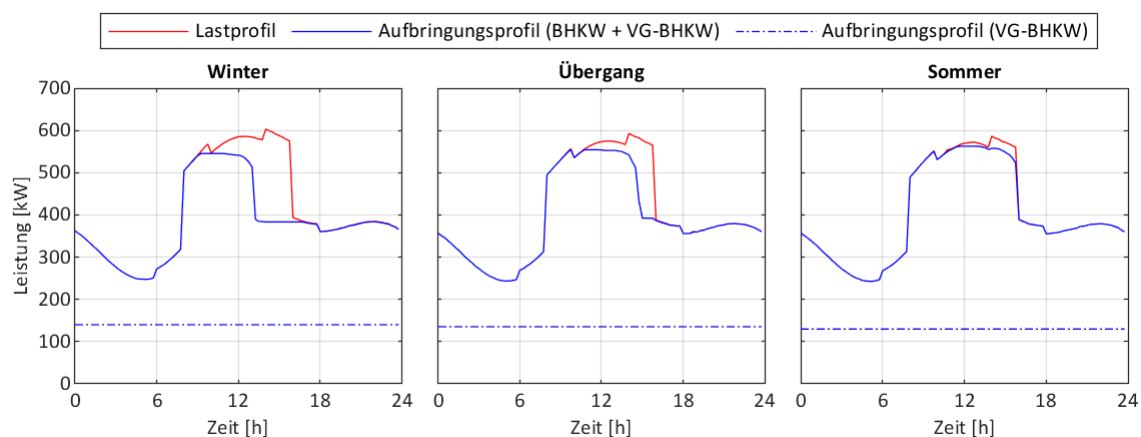
### 6.3.5 Analyseergebnisse: Referenzszenario

Das Referenzszenario (RS) bildet den Ausgangszustand ab und dient als Vergleichsszenario. Im RS erfolgt keine Flexibilisierung, es wird jedoch je Zeitschritt die Elektrizitätsaufbringung des Faulgas-BHKWs an den Elektrizitätsbedarf des jeweiligen Energieverbundes bestmöglich angenähert (siehe Kapitel 6.3.5.1). Dies entspricht dem Stand der Technik, wobei eine Orientierung am elektrischen Bedarf, auf den im Vergleich zum Preis für thermische Energie höheren Preis für elektrische Energie zurückzuführen ist. [11, 12, 21] Die dafür erforderlichen Speicherkapazitäten werden im Rahmen der Analysen ermittelt.

Bei den in den Kapiteln 6.3.5 bis 6.3.7 dargestellten Ergebnissen liegt der Fokus auf den elektrischen Jahreslast- und -aufbringungsprofilen, Kennzahlen, sowie Flexibilitätspotentialen. Dies ist auf die Zielsetzung der vorliegenden Dissertation, die Rolle von Energieverbunden kommunaler ARAs als Flexibilitätsdienstleister in elektrischen Netzen der Zukunft zu analysieren, zurückzuführen. Um dennoch Auswirkungen auf den thermischen Energiebedarf und die thermische Energieaufbringung aufzuzeigen zu können, werden thermische Energiekennzahlen in den Detailanalysen berücksichtigt.

#### 6.3.5.1 Elektrische Last- und Aufbringungsprofil der Zelle 1 „Energieverbund“

Die Analyse der elektrischen Last- und Aufbringungsprofile der Zelle 1 erfolgt anhand des Energieverbundes „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“, welcher eine Klärschlamm Trocknung und -verwertung beinhaltet. Für diesen Energieverbund sind gemäß Abbildung 6-8 alle OPTIEVLEX-Szenarien durchführbar. Abbildung 6-12 zeigt die mittleren Last- und Aufbringungsprofile des Energieverbundes nach Saisonen im Referenzszenario (RS) und verdeutlicht in Zusammenhang mit den Trockenwetterprofilen in Abbildung 6-6 die vorab beschriebene Anpassung der Betriebsweise des Faulgas-BHKWs an das elektrische Lastprofil des Energieverbundes. Die mittleren Profile nach Saisonen können zur Analyse herangezogen werden, da sich trotz Regenereignissen keine signifikante Abweichung von dem mittleren Profil bei Trockenwetter zeigt (siehe Abbildung 6-6). Aufgrund der grafischen Überdeckung sind elektrische Energie- ( $EAG_{el}$ ) und Leistungsautarkiegrade ( $LAG_{el}$ ), sowie ein elektrischer Eigenverbrauchsanteil ( $EV_{el}$ ) nahe 100 % zu erwarten. Die zunehmende Deckung des Verbrauches vom Winter bis hin zum Sommer ist durch einen steigenden Faulgasanfall begründet. Dies ist auf einen erhöhten Klärschlamm anfall bei steigenden Belebungsbeckentemperaturen zurückzuführen (siehe Kapitel 6.2.2). Gemäß der Aufbringungsprofile stellt der Faulgasspeicher einen Tagesspeicher dar und wird täglich vollständig entleert. Der maximale Speicherfüllstand liegt bei rund  $590 \text{ Nm}^3$ . Die Profile und Speicherfüllstände je 15 min-Zeitschritt stellen die Basis für die netz- und systemdienlichen Szenarioanalysen dar. Das Produktgas-BHKW wird angepasst an den Produktgasanfall konstant betrieben.



**Abbildung 6-12: Referenzszenario nach OPTIEVLEX – Mittlere elektrische Tageslast- und -aufbringungsprofile des Energieverbundes „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ nach Saisonen**

### 6.3.5.2 Energie- und Kostenkennzahlen der Zelle 1 „Energieverbund“

Die auf ein Jahr bezogenen Kennzahlen der Zelle 1 „Energieverbund“ im Referenzszenario sind in Tabelle 6-6 für die ausgewählten Energieverbunde ersichtlich. Hier sind keine Flexibilitätskennzahlen gelistet, da diese erst bei Bereitstellung von Flexibilität ermittelt werden können. Bei Betrachtung der elektrischen Energiekennzahlen wird deutlich, dass alle ausgewählten Energieverbunde einen  $EV_{el}$  von 100 % aufweisen. Hier zeigt sich, dass die elektrische Energieaufbringung, aufgrund der Anpassung der Betriebsweise des Faulgas-BHKWs an den Elektrizitätsbedarf, vollständig intern genutzt wird. Der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T“ weist mit rund 68 % den niedrigsten  $EAG_{el}$  und  $LAG_{el}$  auf. Dies ist auf den zusätzlichen Elektrizitätsbedarf des Trockners zurückzuführen. Mit dem Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ wird aufgrund der thermischen Klärschlammverwertung trotz Trocknerintegration wieder ein höherer  $EAG_{el}$  und  $LAG_{el}$  von rund 96 % erreicht. Da ein  $EV_{el}$  von 100 % vorliegt und damit die intern aufgebrauchte elektrische Energie in jedem Zeitschritt intern genutzt wird, weisen der  $EAG_{el}$  und  $LAG_{el}$  analoge Werte auf.

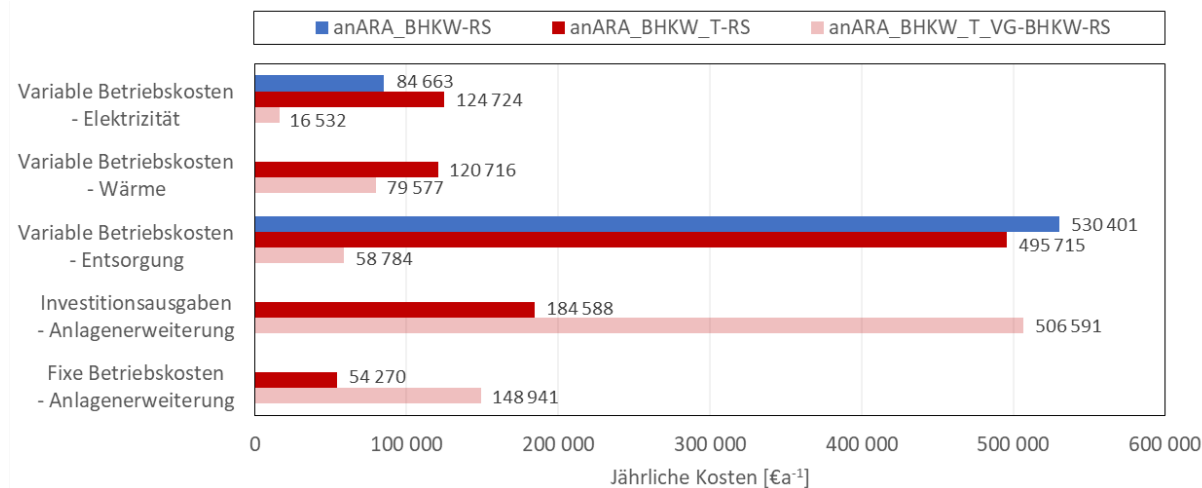
**Tabelle 6-6: Referenzszenario nach OPTIEVLEX – Energiekennzahlen der ausgewählten Energieverbunde „anARA\_BHKW“, „anARA\_BHKW\_T“ und „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“**

Energiekennzahl	Einheit	Wert nach Energieverbund		
		anARA_BHKW	anARA_BHKW_T	anARA_BHKW_T_VG-BHKW
Elektrischer Energieautarkiegrad ( $EAG_{el}$ )	%	76	68	96
Elektrischer Leistungsautarkiegrad ( $LAG_{el}$ )	%	76	68	96
Elektrischer Eigenverbrauchsanteil ( $EV_{el}$ )	%	100	100	100
Thermischer Energieautarkiegrad ( $EAG_{th}$ )	%	175	55	88
Thermischer Leistungsautarkiegrad ( $LAG_{th}$ )	%	100	43	62
Thermischer Eigenverbrauchsanteil ( $EV_{th}$ )	%	57	79	71

Hinsichtlich der thermischen Energiekennzahlen weist der Energieverbund „anARA\_BHKW“ einen  $EAG_{th}$  von rund 174 %, eine  $LAG_{th}$  von 100 % und einen  $EV_{th}$  von rund 57 % vor. Anhand des  $EAG_{th}$  ist erkennbar, dass die Wärmeaufbringung den Wärmebedarf klar übersteigt. Somit kann der Bedarf zu jedem Zeitpunkt vollständig mittels eigener Aufbringung gedeckt werden, was der  $LAG_{th}$  von 100 % bestätigt. Jedoch wird aufgrund der Überdeckung nur 57 % der ARA-internen Wärmeaufbringung für eigene Zwecke genutzt. Die überschüssige Wärme könnte einer internen (z.B. Klärschlamm-trocknung) oder externen (z.B. Fernwärmeeinspeisung) Nutzung zugeführt werden. Die Auswirkungen einer internen Nutzung mittels Trockner auf die thermischen Energiekennzahlen der Zelle 1 kann anhand des Energieverbundes „anARA\_BHKW\_T“ analysiert werden. Hier kommt es zu einer deutlichen Reduktion des  $EAG_{th}$  auf rund 55 %, womit nur rund die Hälfte des Wärmebedarfs über die ARA-interne Wärmeaufbringung gedeckt werden kann. Die am elektrischen Verbrauch orientierte Betriebsführung des Faulgas-BHKWs führt dazu, dass die Wärmeaufbringung nicht an den Wärmebedarf angepasst ist. Rund 20 % der internen Aufbringung fällt daher außerhalb der Betriebszeiten des Trockners an, was zu einem  $EV_{th}$  von 79 % führt. Zudem kann während der Betriebszeiten des Trockners dessen Wärmebedarf zu keinem Zeitpunkt vollständig gedeckt werden, was quantitativ durch einen  $LAG_{th}$  von 43 % untermauert wird. Die aufgrund der thermischen Klärschlammverwertung und anschließenden Nutzung eines Produktgas-BHKWs erhöhte Wärmeaufbringung im Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ führt zur Steigerung des  $EAG_{th}$  auf rund 88 %. Da das Produktgas-BHKW konstant betrieben wird fällt hier rund 30 % der Wärmeaufbringung außerhalb der Betriebszeiten des Trockners an, womit der  $EV_{th}$  nur rund 71 % beträgt. Zudem kann trotz erhöhter Wärmeaufbringung während der Betriebszeiten des Trockners dessen Wärmebedarf zu keinem Zeitpunkt vollständig gedeckt werden, sodass der  $LAG_{th}$  ca. 62 % beträgt. In den Energieverbunden „anARA\_BHKW\_T“ und „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ könnte der Einsatz eines Wärmespeichers zur Verschiebung der Wärmeaufbringung in die Betriebszeiten des Trockners die  $LAG_{th}$  und  $EV_{th}$  erhöhen.

Abbildung 6-13 zeigt die Kostenkennzahlen der Energieverbunde. Die variablen Betriebskosten ( $Opex_{variabel}$ ) für Elektrizität und Wärme stehen im indirekten Zusammenhang mit dem jeweiligen LAG. Eine Reduktion des LAG führt zu einer Erhöhung der Kosten, da mehr Elektrizität bzw. Wärme aus externen Quellen zugekauft werden muss. Beispielsweise weist der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T“ mit dem niedrigsten  $LAG_{el}$  und  $LAG_{th}$  die höchsten Elektrizitäts- und Wärmekosten auf. Die gesamten Energiekosten des Energieverbundes „anARA\_BHKW\_T“ liegen aufgrund des Trockners bei rund 245.400  $€a^{-1}$ . Der Energieverbund „anARA\_BHKW“ ist mit den niedrigsten Energiekosten von ca. 84.700  $€a^{-1}$  verbunden. Der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ zeigt gesamte Energiekosten von 96.100  $€a^{-1}$ , womit die Integration einer Klärschlammverwertung mittels Vergaser und Produktgas-BHKW einen großen Teil der zusätzlichen Energiekosten einer Klärschlamm-trocknung abfedern kann.





**Abbildung 6-13: Referenzszenario (RS) nach OPTIEVLEX – Kostenkennzahlen der ausgewählten Energieverbunde „anARA\_BHKW“, „anARA\_BHKW\_T“ und „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“**

Die variablen Betriebskosten ( $Opex_{variabel}$ ) für die Entsorgung von entwässertem Klärschlamm liegen beim Energieverbund „anARA\_BHKW“ bei rund 530.000 €a<sup>-1</sup>. Der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T“ weist niedrigere Entsorgungskosten von ca. 495.000 €a<sup>-1</sup> auf. Die Kostenreduktion ist auf den höheren Trockengehalt (TG) des getrockneten Schlammes und den damit verbundenen niedrigeren Transportkosten zurückzuführen. Dabei gilt zu beachten, dass die Kostenreduktion eher gering ausfällt, da sich der höhere TG aufgrund der auf die Trockensubstanz bezogenen Abgabekosten nur auf die Transportkosten auswirkt. Reduzieren sich durch die Trocknung auch die Abgabekosten sind deutlich niedrigere Entsorgungskosten zu erwarten, welche zur Wirtschaftlichkeit einer Trocknerintegration beitragen würden. Für die Entsorgung der Klärschlammasche des Energieverbundes „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ fallen die Kosten mit rund 59.000 €a<sup>-1</sup> am geringsten aus.

Abbildung 6-13 zeigt, dass die Integration eines Trockners im Energieverbund „anARA\_BHKW\_T“ mit Kosten für eine Anlagenerweiterung, welche sich aus jährlichen Investitionsausgaben ( $Capex$ ) und fixen Betriebskosten ( $Opex_{fix}$ ) zusammensetzen, von rund 238.900 €a<sup>-1</sup> verbunden ist. Bei zusätzlicher Integration eines Klärschlammverwertungskonzeptes im Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ fallen rund 655.500 € jährliche Kosten für die Anlagenerweiterung an.

Bei Betrachtung aller Kostenbestandteile weist der Energieverbund „anARA\_BHKW“ die niedrigsten jährlichen Gesamtkosten von rund 530 400 € auf. Der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ ist mit Gesamtkosten von ca. 810.400 €a<sup>-1</sup> verbunden. Hier können die hohen  $Capex$  und  $Opex_{fix}$  durch reduzierte  $Opex_{variabel}$  teilweise kompensiert werden und führen zu niedrigeren jährlichen Gesamtkosten als beim Energieverbund „anARA\_BHKW\_T“, welcher aufgrund zusätzlicher  $Capex$  und der hohen  $Opex_{variabel}$  Gesamtkosten von ca. 980.000 €a<sup>-1</sup> aufweist.

### 6.3.5.3 Energie- und Kostenkennzahlen der Zelle 2 „Quartier“

Die auf ein Jahr bezogenen Kennzahlen der Zelle 2 „Quartier“ im Referenzszenario sind in Tabelle 6-7 ersichtlich. Die Kennzahlen dienen als Vergleichsbasis, um die Auswirkungen der Flexibilitätsbereitstellung auf die Erneuerbare-Energiegemeinschaft analysieren zu können.

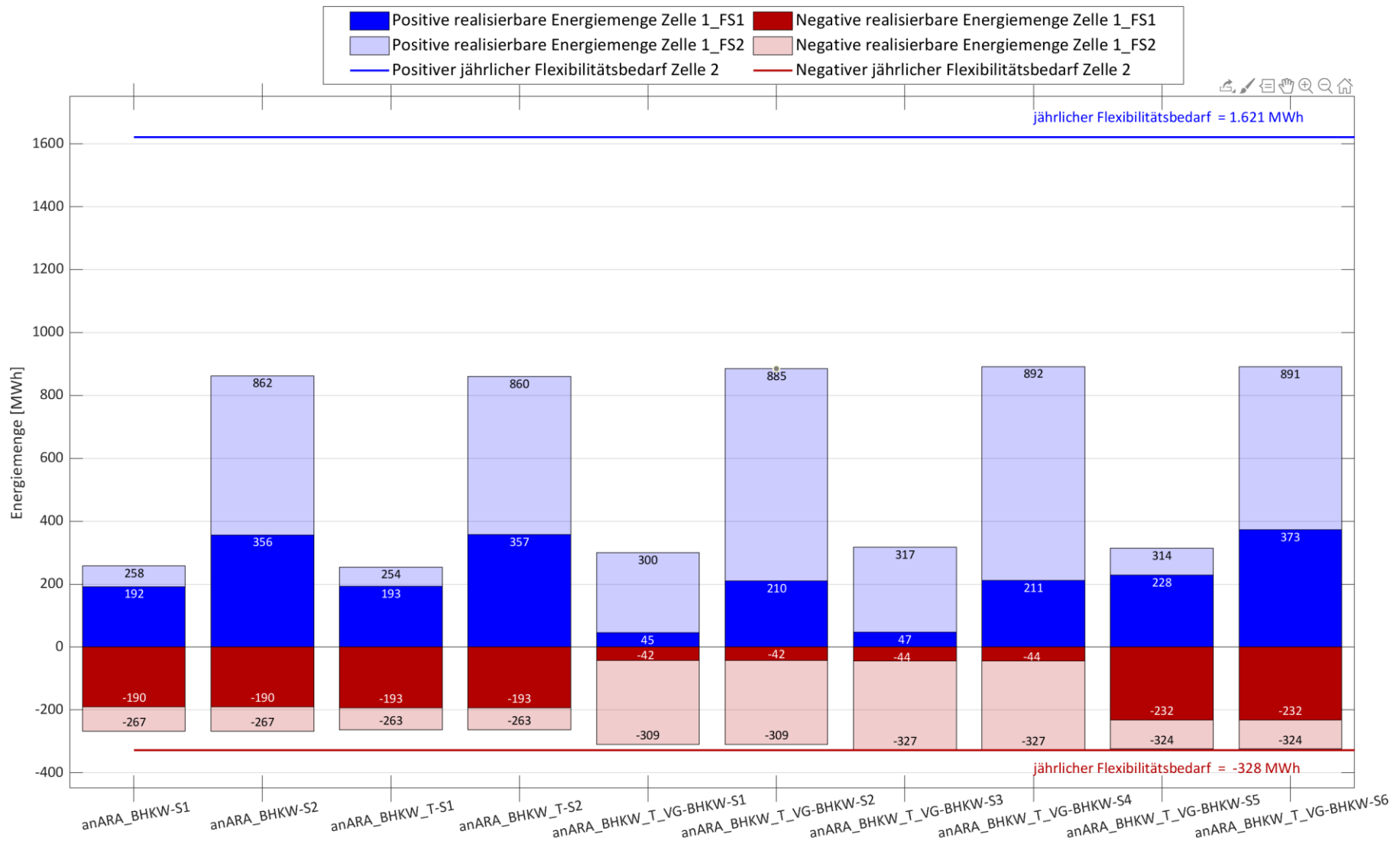
**Tabelle 6-7: Referenzszenario nach OPTIEVLEX – Energie- und Kostenkennzahlen der Zelle 2 „Quartier“**

Energie- und Kostenkennzahl	Einheit	Wert
Elektrischer Energieautarkiegrad ( $EAG_{el}$ )	%	44
Elektrischer Leistungsautarkiegrad ( $LAG_{el}$ )	%	30
Elektrischer Eigenverbrauchsanteil ( $EV_{el}$ )	%	68
Kosten für Zukauf elektrischer Energie ( $KeE_{el}$ )	€a <sup>-1</sup>	369.966
Erlöse für Einspeisung elektrischer Energie ( $E_{el}$ )	€a <sup>-1</sup>	12.835

Die Kosten für zugekaufte elektrische Energie der Zelle 2 „Quartier“ beruhen auf einem Strompreis für Haushaltskunden von 22,83 CentkWh<sub>el</sub><sup>-1</sup>, welcher über dem für die kommunale ARA angenommenem Strompreis von 11,93 CentkWh<sub>el</sub><sup>-1</sup> liegt [102]. Die Erlöse basieren auf der Annahme eines Einspeisetarifes von 3,91 CentkWh<sub>el</sub><sup>-1</sup> für überschüssigen PV-Strom [140].

### 6.3.6 Analyseergebnisse: Netzdienliche Szenarien

Im Rahmen der Analyse 3 dienen die netzdienlichen Szenarien der Ermittlung des realisierbaren elektrischen Flexibilitätspotentials zum Ausgleich von Residuallasten innerhalb der regionalen Erneuerbaren-Energiegemeinschaft „Energieverbund-Quartier“. Dabei umfasst die Systemgrenze wie in Kapitel 6.3.1 beschrieben die Zelle 1, welche die energietechnisch optimierten Energieverbunde „anARA\_BHKW“, „anARA\_BHKW\_T“ und „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ abbildet, und die Zelle 2, welche das Quartier mit einer regionalen Residuallast repräsentiert. Um das realisierbare Flexibilitätspotential der Zelle 1 je nach Energieverbund und Szenario analysieren zu können, stehen in den Kapiteln 6.3.6.1 bis 6.3.6.4 die Flexibilitätskennzahlen (siehe Kapitel 5.2) der Zelle 1 im Fokus. Eine detaillierte Ergebnisdarstellung, hinsichtlich der Anzahl an Abrufen, der Betriebsführung der flexiblen Aggregate und der Speicherfüllstände, erfolgt anhand von ausgewählten Szenarien in den Kapiteln 6.3.6.2 bis 6.3.6.4. Die Auswahl der Szenarien wird auf Basis der realisierbaren flexiblen Energiemengen nach Kapitel 6.3.6.1 getroffen. In den Kapiteln 6.3.6.5 bis 6.3.6.7 werden die Auswirkungen der Flexibilisierung auf die Energie- und Kostenkennzahlen der Zelle 1 und der regionalen Erneuerbaren-Energiegemeinschaft „Energieverbund-Quartier“ dargestellt.



**Abbildung 6-14: Netzdienliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Jährliche realisierbare positive und negative elektrische Energiemenge der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Szenario (S) im Vergleich zum jährlichen Flexibilitätsbedarf der Zelle 2 „Quartier“**

### 6.3.6.1 Realisierbare flexible Energiemenge der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Szenarien

Der Vergleich der realisierbaren positiven und negativen flexiblen Energiemengen der Zelle 1 „Energieverbund“ mit dem jährlichen Flexibilitätsbedarf der Zelle 2 „Quartier“ in Abbildung 6-14 ermöglicht eine Übersicht über die Wirksamkeit der netzdienlichen Szenarien (S) und Flexibilisierungsstrategien (FS) hinsichtlich Residuallastausgleich.

Abbildung 6-14 zeigt, dass die FS1 generell zu niedrigeren realisierbaren Energiemengen als die FS2 führt. Dies ist auf die definierten Nutzerspezifikationen des Blocks „Flexibilitätseinsatzmodell“ (siehe Kapitel 6.3.4) zurückzuführen. Vor allem beim Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ sind im S1 – S4 niedrige Werte ersichtlich. Dies ist auf die Energieaufbringung des Produktgas-BHKWs zurückzuführen, welche in Kombination mit der begrenzten Leistungserhöhung des Faulgas-BHKWs zu einer starken Reduktion der realisierbaren Energiemenge des Faulgas-BHKWs führt. In S5 und S6 zeigt die FS1 aufgrund der Verschiebung der Klärschlammnutzung in den Winter höhere realisierbare Energiemengen, was auf den reduzierten Einfluss der begrenzten Leistungserhöhung auf die Flexibilisierung des Faulgas-BHKWs zurückzuführen ist. Die Energieverbunde „anARA\_BHKW“ und „anARA\_BHKW\_T“ zeigen ähnliche realisierbare Energiemengen. Dies ist durch die gleichen verfügbaren flexiblen Aggregate begründet. Die etwas höheren Werte des Energieverbundes „anARA\_BHKW\_T“ sind durch ein nach oben verschobenes Bedarfsprofil aufgrund der Trocknerintegration zu erklären (siehe Abbildung 6-6).

Die FS2 ist ohne Begrenzung der Flexibilitäten auf Basis der Zuflussmenge oder dem Bedarfsprofil des Energieverbundes mit höheren realisierbaren flexiblen Energiemengen verbunden als die FS1. Dabei werden Werte erreicht, die sich vor allem im negativen Bereich stark an den jährlichen Flexibilitätsbedarf der Zelle 2 annähern. Beispielsweise führt die Flexibilisierung des Produktgas-BHKWs bei dem Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ im S3 - S6 zu einer nahezu vollständigen Deckung des jährlichen Flexibilitätsbedarfs der Zelle 2. Hinsichtlich der positiven realisierbaren Energiemenge sind die S2, S4 und S6 hervorzuheben, welche aufgrund der Berücksichtigung der flexiblen Aggregate höhere Werte aufweisen. Bei der FS2 gilt allerdings aufgrund der höheren maximalen Abschaltdauer der flexiblen Aggregate zu beachten, dass bei realen Anlagen eine laufende Überprüfung der Reinigungsleistung vorgenommen werden sollte. Bis zu 120 min andauernde Abschaltungen könnten zu einer Verletzung der gesetzlichen Ablaufgrenzwerte [95] führen. Zudem ist bei den Pumpen darauf zu achten, dass ausreichend Pufferkapazitäten zur Zwischenspeicherung von Abwasser oder Schlamm zur Verfügung stehen.

Bei genauerer Betrachtung der in Abbildung 6-14 aufgezeigten Resultate wird ersichtlich, dass für die ausgewählten Energieverbunde eine Flexibilisierung des Faulgas-BHKWs (S1) im Rahmen der FS2, mit einer positiven Energiemenge von 254 – 300 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> verbunden ist. Die negative Energiemenge nimmt Werte zwischen -263 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> und -309 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> an. Ein zusätzlicher Einsatz von flexiblen Aggregaten (S2) führt zu einer Erhöhung der positiven realisierbaren Energiemenge auf 860 – 885 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup>. Die Maximalwerte zeigt der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“. Die zusätzliche Flexibilisierung eines über das Jahr konstant betriebenen Produktgas-BHKWs (S3 und S4) führt zu einer Erhöhung der positiven realisierbaren Energiemenge des Energieverbundes von 17 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup>. Die negativen Energiemengen zeigen eine Steigerung von 16 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup>. Bei einem saisonalen Betrieb des Produktgas-BHKWs im S5, werden bei Durchführung der FS1 vierfach erhöhte Energiemengen im Vergleich zum S1 bzw. S2 erreicht. Inklusive der flexiblen Aggregate können im S6 bei der FS1 bereits bis zu 373 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> und -232 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> bereitgestellt werden. Bei der FS2 stehen bis zu 891 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> und -324 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> zur Verfügung.

Um zu analysieren welche Auswirkungen die Bereitstellung netzdienlicher Flexibilität auf die Betriebsführung der flexiblen Aggregate der Zelle 1 „Energieverbund“ und die Residuallast der Zelle 2 „Quartier“ hat werden ausgewählte Szenarien nachfolgend einer Detailanalyse unterzogen. Die Detailanalyse soll zudem aufzeigen, welche Nutzerspezifikationen (siehe Kapitel 6.3.4) die Ausschöpfung des theoretischen Flexibilitätspotentials (siehe Kapitel 6.2.3) besonders beeinflussen bzw. begrenzen. Für die Detailanalysen werden die S2, S4 und S6 herangezogen. Dies ist darin begründet, dass die Szenarien untersucht werden sollen, die eine möglichst hohe realisierbare Energiemenge aufweisen und somit einen großen Beitrag zum Ausgleich der Residuallasten leisten können. Bei Durchführung der FS1 ist das S2 für die Energieverbunde „anARA\_BHKW“ und „anARA\_BHKW\_T“ mit den höchsten realisierbaren flexiblen Energiemengen verbunden. Für den Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ liefert das S6 die höchsten Energiemengen. Die offensive Strategie FS2 führt bei allen Szenarien die die flexiblen Lasten des Reinigungsprozesses berücksichtigen (S2, S4 und S6) zu ähnlichen Ergebnissen. Für die Energieverbunde „anARA\_BHKW“ und „anARA\_BHKW\_T“ liefert jedoch das S2 die höchsten Energiemengen. Bei integrierte Klärschlammverwertung im Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ werden im S4 die größten Energiemengen bereitgestellt. Da alle Szenarien auf den gleichen Nutzerspezifikationen basieren können die nachfolgend gewonnenen Erkenntnisse auf die S1, S3 und S5 übertragen werden.

6.3.6.2 Detailanalyse zum Szenario 2

Das S2 gemäß Abbildung 6-8 kann auf alle Energieverbunde angewandt werden und berücksichtigt die Flexibilisierung des Faulgas-BHKWs, sowie der flexiblen Lasten des Reinigungsprozesses. Tabelle 6-8 zeigt die Anzahl der 15 min-Abrufe je flexiblem Aggregat für die ausgewählten Energieverbunde und Flexibilisierungsstrategien. Die Abrufe stellen die Basis zur Ermittlung der realisierbaren Energiemengen nach Abbildung 6-14 dar. Generell wird in Tabelle 6-8 ersichtlich, dass nicht wie bei der Ermittlung des theoretischen Flexibilitätspotentials (siehe Kapitel 6.2.3) angenommen jeder 15 min-Zeitschritt (= 35.040 Zeitschritte) je Aggregat zur Bereitstellung von Flexibilität genutzt werden kann. Dies ist auf mehrere Faktoren zurückzuführen, welche nachfolgend diskutiert werden.

**Tabelle 6-8: Netzdienliches Szenario 2 nach OPTIEVLEX – Anzahl der 15 min-Abrufe in einem Jahr je flexiblem Aggregat der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Flexibilisierungsstrategie (FS)**

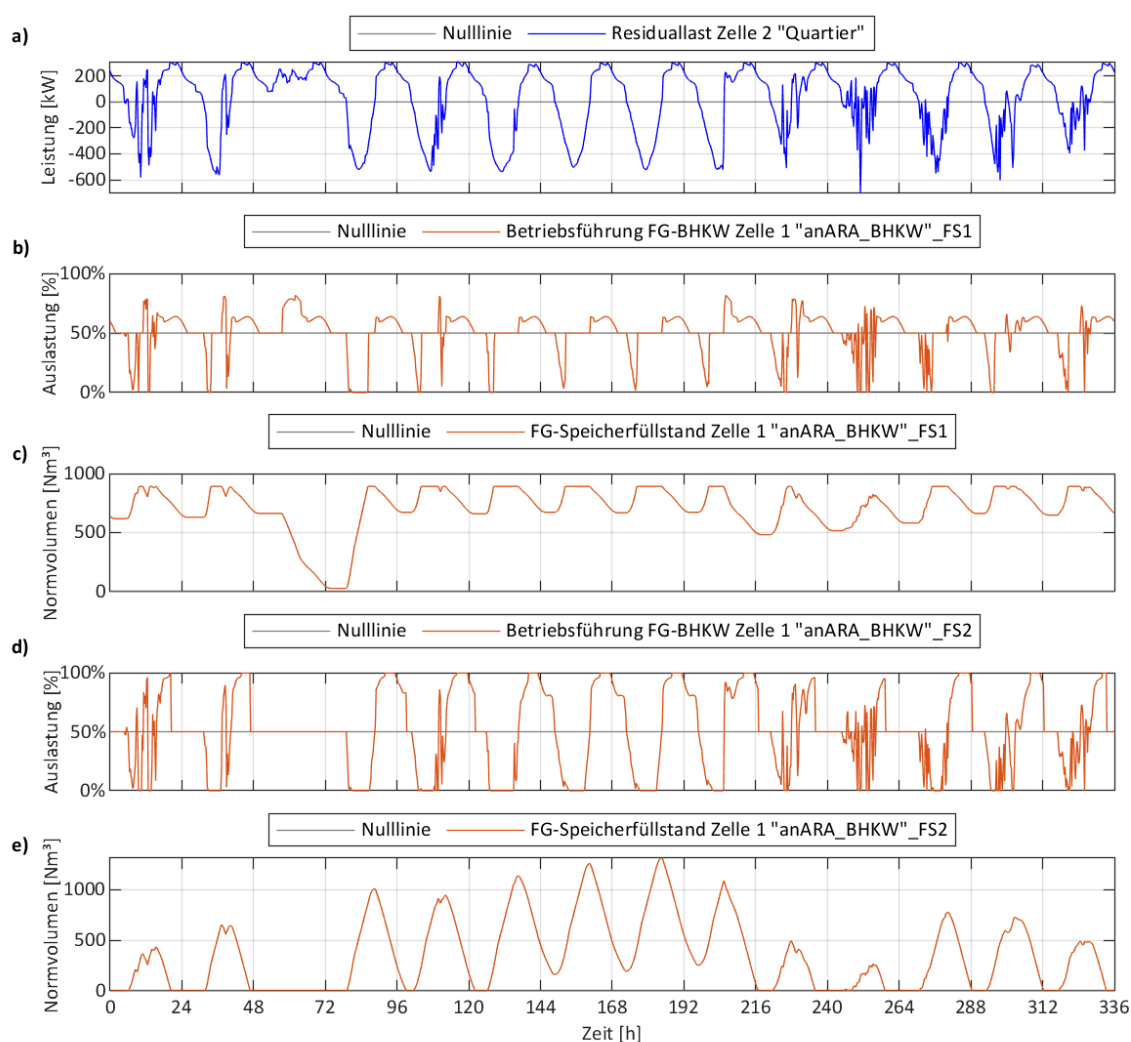
Flexibles Aggregat	Anzahl der 15 min-Abrufe nach Energieverbund und FS					
	anARA_BHKW		anARA_BHKW_T		anARA_BHKW_T_VG-BHKW	
	FS1	FS2	FS1	FS2	FS1	FS2
Faulgas-BHKW	14.662	11.763	14.495	11.690	4.962	12.632
Produktgas-BHKW	-	-	-	-	-	-
Zulaufpumpwerk	4.148	10.826	4.131	10.860	4.122	10.412
Sandfanggebläse	3.951	10.833	3.940	10.866	3.953	10.447
Belüftung	4.314	12.254	4.297	12.286	4.315	11.911
Rezirkulation	3.990	10.159	3.978	10.188	3.986	9.810
Rücklaufschlammpumpe	4.068	10.416	4.056	10.443	4.063	10.049

BEGRENZUNG DER FLEXIBILITÄT DES FAULGAS-BHKWS

Bei Vorliegen positiver Residuallasten und einem Faulgasspeicherfüllstand > 0 kann das Faulgas-BHKW je 15 min-Zeitschritt positive Flexibilität durch Erhöhen der Leistung bis auf Nennleistung (= 540 kW<sub>el</sub>) bereitstellen. Da die netzdienlichen Szenarien auf den Ergebnissen des Referenzszenarios (siehe Kapitel 6.3.5) aufbauen, weist der Faulgasspeicher einen Füllstand > 0 auf, wenn im Rahmen des Referenzszenarios zur Anpassung der Aufbringung an den Bedarf (siehe Abbildung 6-12) Faulgas gespeichert wird. Zudem kann sich der Füllstand erhöhen, wenn Faulgas im Zuge einer Reduktion der BHKW-Leistung beim Abruf negativer Flexibilität gespeichert wird. Hier gilt zu erwähnen, dass ein Hochfahren des BHKWs auch durch Zufeuerung von Erd- oder Biogas möglich wäre. Dies würde die Bedienung zusätzlicher netzdienlicher Abrufe ermöglichen, was zu einer Erhöhung der realisierbaren flexiblen Energiemenge führen würde. Ziel der vorliegenden Dissertation ist jedoch die Ermittlung des Flexibilitätspotentials auf Basis der dezentral (ARA-intern) anfallenden erneuerbaren Energieträger Faulgas und Klärschlamm. Eine Zufeuerung wird daher nicht berücksichtigt.

Neben positiver Flexibilität kann das Faulgas-BHKW auch zur Bereitstellung von negativer Flexibilität herangezogen werden. Dies wird je nach Höhe der negativen Residuallast über eine Reduktion der Elektrizitätsaufbringung bzw. eine vollständige Abschaltung des BHKWs ermöglicht. Dabei erfolgt jeweils eine Speicherung des nicht genutzten Faulgases im Faulgasspeicher. Da eine Einspeicherung nur vorgenommen werden kann, wenn ausreichend Speicherkapazität zur Verfügung steht, ist die negative Flexibilität durch das Speichervolumen beschränkt.

Um die Ausführungen zu verdeutlichen zeigt Abbildung 6-15 die Residuallast der Zelle 2 „Quartier“, sowie die Auslastung des Faulgas-BHKWs und den zugehörigen Speicherfüllstand je Flexibilisierungsstrategie für den Energieverbund „anARA\_BHKW“ (Zelle 1). Die Verläufe repräsentieren zwei exemplarische Sommerwochen, welche die Tage mit den höchsten negativen Residuallasten des Jahres von bis zu -704 kW beinhalten.



**Abbildung 6-15: Netzdienliches Szenario 2 nach OPTIEVLEX – a) Residuallast der Zelle 2 „Quartier“, b) Betriebsführung des Faulgas (FG)-BHKWs und c) Faulgasspeicherfüllstand bei Durchführung der FS1, sowie d) Betriebsführung des FG-BHKWs und e) Faulgasspeicherfüllstand bei Durchführung der FS2 für zwei exemplarische Sommerwochen für den Energieverbund „anARA\_BHKW“ (Zelle 1)**

Gemäß Abbildung 6-15 zeigt die Residuallast des „Quartiers“ (Zelle 2) vor allem zu den Mittagsstunden negative Werte, was auf eine Überdeckung der Last durch eine hohe PV-Einspeisung zurückzuführen ist. Tritt eine negative Residuallast in Zelle 2 auf, erfolgt bei ausreichender Speicherkapazität eine Reduktion der Faulgas-BHKW-Auslastung in Zelle 1 (Energieverbund). Beispielsweise zeigt der erste Tag (Stunde 0 – 24), dass die Auslastung bei Anwendung der FS1 in einem geringeren Ausmaß reduziert werden kann als bei Durchführung der FS2. Hier ist die begrenzte Speicherkapazität der FS1 ( $= 900 \text{ Nm}^3$ ) der ausschlaggebende Faktor. Dies ist auch in den weiteren Tagen zu beobachten. Zudem führt die im Rahmen der FS1 angenommene Begrenzung der BHKW-Maximalleistung durch das Bedarfsprofil des Energieverbundes zu einer geringeren Erhöhung der Aufbringung bei positiver Residuallast, was mit einer geringeren Speicherentladung verbunden ist. Beispielsweise erreicht das Faulgas-BHKW bei der FS1 innerhalb der zwei Wochen nie die Nennleistung ( $540 \text{ kW}_{el} = 100 \% \text{ Auslastung}$ ). Die maximale Speicherkapazität wird daher vor der täglichen Residuallastspitze erreicht und der Ausgleich kann nur mehr begrenzt erfolgen. Der Speicher kumuliert sich aufgrund der häufig auftretenden negativen Residuallasten im Sommer auf und bleibt nahe der Kapazitätsgrenze. Dies ist bei Durchführung der FS1 auch bei den Energieverbunden „anARA\_BHKW\_T“ und „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ zu beobachten. Bei Betrachtung der Verläufe der FS2 wird ersichtlich, dass die Auslastung des Faulgas-BHKWs ohne Speicherbegrenzung stärkere Schwankungen aufweist. Das BHKW wird z.B. bis zu 8 Stunden (Stunde 120 – 144) vollständig ausgeschaltet. Der Faulgasspeicherfüllstand erreicht dabei maximal  $1.313 \text{ Nm}^3$ . Zudem erfolgt im Rahmen der FS2 keine Begrenzung durch das Bedarfsprofil, womit das BHKW jederzeit bis auf die Nennleistung hochgefahren werden kann. Aufgrund der erhöhten Speicherkapazitäten wird dies innerhalb der zwei Wochen beinahe jeden Tag durchgeführt. Die positive realisierbare flexible Energiemenge des Faulgas-BHKWs erhöht sich dadurch im Rahmen der FS2 um  $67 \text{ MWh}_{el} \text{ a}^{-1}$ . Zusammenfassend bestätigt sich, dass das Flexibilitätspotential des Faulgas-BHKWs nicht jede viertel Stunde zur Verfügung steht. Ausschlaggebende Faktoren sind das maximale Speichervolumen, sowie die Begrenzung der maximalen flexiblen Leistung durch das Bedarfsprofil des Energieverbundes.

Hier gilt zu erwähnen, dass die Energieverbunde „anARA\_BHKW“ und „anARA\_BHKW\_T“ gemäß Tabelle 6-8 bei der FS2 eine niedrigere Anzahl an Faulgas-BHKW-Abrufen aufweisen als bei der FS1. Zur Erklärung kann der Tag drei (Stunde 48 – 72) gemäß Abbildung 6-15 herangezogen werden. Lange Perioden mit positiver Residuallast führen bei Hochfahren auf Nennleistung bereits vor Eintreten einer erneuten negativen Residuallast zu einer vollständigen Entleerung des Gasspeichers. Bei einem Füllstand  $= 0$  kann keine flexible Energiemenge mehr zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund der vollständigen Abschaltungen, bzw. dem Hochfahren bis auf Nennlast, kann dennoch mit der FS2 eine höhere Energiemenge (siehe Abbildung 6-14) bereitgestellt werden. Dies ist nicht auf den



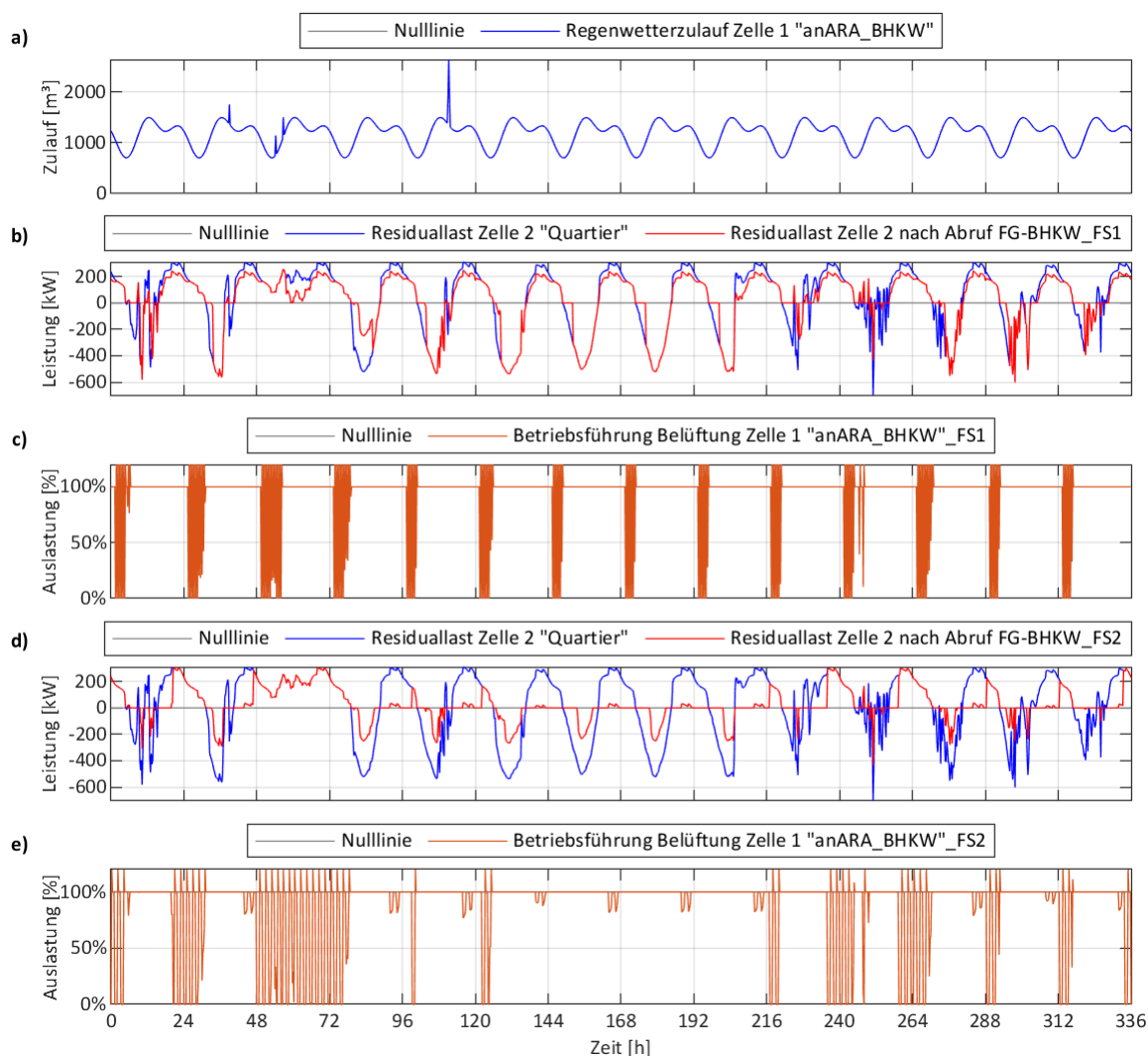
Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ übertragbar, da hier die Begrenzung durch das Bedarfsprofil des Energieverbundes die Flexibilität des Faulgas-BHKWs einschränkt und nur wenige Abrufe ermöglicht.

### BEGRENZUNG DER FLEXIBILITÄT DER FLEXIBLEN LASTEN DES REINIGUNGSPROZESSES

Die flexiblen Lasten des Reinigungsprozesses können beim Auftreten positiver Residuallasten positive Flexibilität mittels Reduktion der Leistung oder vollständiger Abschaltung bereitstellen. In OPTIEVLEX werden, wie in Kapitel 5.7.4 erläutert, die flexiblen Aggregate bei mehr als 5.000 Volllaststunden und einer Leistung  $> 5 \text{ kW}_{\text{el}}$  zur Flexibilisierung herangezogen. Wie in Tabelle 6-8 ersichtlich, werden diese Kriterien erfüllt und alle flexiblen Aggregate je nach Verfügbarkeit abgerufen. Die Verfügbarkeit hängt dabei je Zeitschritt vom Abwasserzulaufvolumenstrom, sowie von den maximalen Abschaltdauern und den damit verbundenen Regenerationszeiten ab (siehe Kapitel 5.7.4). Im Rahmen der FS1 werden die Aggregate bei einem Zulaufvolumenstrom, der unter dem mittleren stündlichen Trockenwetterzulauf von rund  $1.170 \text{ m}^3$  liegt für den Abruf freigegeben. Im Rahmen der FS2 stehen die Aggregate bei jeglichem Trockenwetterzulauf zum Abruf zur Verfügung, lediglich bei Regenwetterereignissen und damit verbundenen Zulaufvolumenströmen über dem maximalen Trockenwetterzulauf ist kein Abruf möglich. Ist das Zulauf-Kriterium erfüllt, werden die flexiblen Aggregate gemäß ihrer maximalen Abschaltdauer beginnend mit dem höchsten theoretischen Flexibilitätspotential der Reihe nach zur Abdeckung der Residuallast flexibilisiert. Im Falle der ausgewählten Energieverbunde wird die Belüftung als erstes Aggregat abgefragt, gefolgt von dem Zulaufpumpwerk, der Rücklaufschlammpumpe, der Rezirkulation und dem Sandfanggebläse. Wird die maximale Abschaltdauer erreicht, folgt eine Regenerationszeit, in welcher keine Flexibilität bereitgestellt werden kann.

Negative Flexibilität über flexible Lasten des Reinigungsprozesses ist im Rahmen von OPTIEVLEX nicht verfügbar, da ein abrufbedingtes Hochfahren der Aggregate gemäß Literatur [11–14] aus kapazitiven Gründen nur begrenzt möglich ist und ein Leerlauf, z.B. von Pumpen oder Rührwerken, nicht wirtschaftlich ist. Ein Verschieben des Abpumpens von Pufferkapazitäten zu Zeitschritten mit negativer Residuallast wird daher nicht berücksichtigt. Das Abpumpen erfolgt jeweils im Rahmen der Regenerationszeit direkt nach dem Abruf. Im Vergleich zum Referenzszenario erhöht sich dabei die Pumpenleistung um die vorab abrufbedingte Reduktion der Leistung.

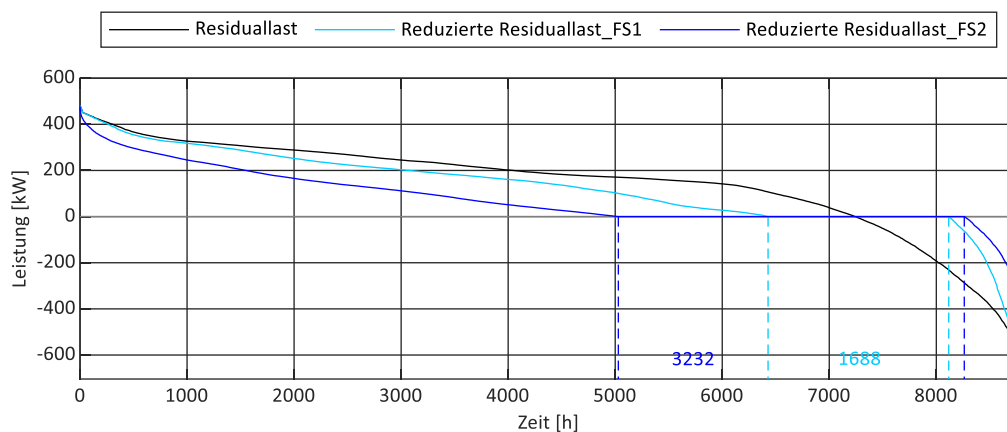
Zur Verdeutlichung der Ausführungen zeigt Abbildung 6-16 den Regenwetterzulaufvolumenstrom, sowie die Residuallast der Zelle 2 nach Abruf des Faulgas-BHKWs und die Auslastung der Belüftung je FS für den Energieverbund „anARA\_BHKW“ (Zelle 1). Die Verläufe repräsentieren ebenfalls die zwei exemplarischen Sommerwochen, welche die Tage mit den höchsten negativen Residuallasten des Jahres von bis zu  $-704 \text{ kW}$  beinhalten.



**Abbildung 6-16: Netzdienliches Szenario 2 nach OPTIEVLEX – a) Regenwetterzulauf Zelle 1, b) Residuallast der Zelle 2 nach Abruf des Faulgas (FG)-BHKWs und c) Betriebsführung der Belüftung bei Durchführung der FS1, sowie d) Residuallast der Zelle 2 nach Abruf des FG-BHKWs und e) Betriebsführung der Belüftung bei Durchführung der FS2 für zwei exemplarische Sommerwochen für den Energieverbund „anARA\_BHKW“ (Zelle 1)**

In Abbildung 6-16 ist beispielsweise an Tag 3 (Stunde 48 – 72) ersichtlich, dass sich der Zulaufvolumenstrom bei Regenereignissen erhöht, was im Rahmen der FS1 beim zweiten Regenereignis des Tages zur Überschreitung des Zulauf-Grenzwertes und damit zum Abbruch der Bereitstellung von positiver Flexibilität führt. Zudem ist erkennbar, dass nach Abruf des Faulgas-BHKWs, welches zu Beginn abgefragt wird (siehe Kapitel 5.7.4), bereits eine reduzierte Residuallast vorliegt, die als Flexibilitätsbedarfsprofil für die Belüftung gilt. Im Rahmen der FS1 zeigt sich aufgrund der vorab diskutierten Begrenzungen der Faulgas-BHKW-Flexibilität eine deutlich geringere Reduktion der Residuallast. Dies zeigt sich beispielsweise auch in den vermehrten Abrufen der Belüftung an den Tagen 7 – 9 (Stunden 144 – 216). Hier erfolgen jeweils morgens Abrufe welche im Rahmen der FS2 aufgrund der vollständig ausgeglichenen positiven Residuallast nicht mehr vorkommen. Dennoch weist die FS1 gemäß Tabelle 6-8 eine geringere Anzahl an Abrufen auf, da der Zulauf-Grenzwert einen großen Einfluss auf die

Abrufbarkeit ausübt. Dies zeigt sich auch in Abbildung 6-16, da im Rahmen der FS1 die Abrufe nur morgens bei niedrigem Zulaufvolumenstrom erfolgen, während im Rahmen der FS2 Abrufe über den ganzen Tag hinweg stattfinden. Besonders an Tag 3 (Stunde 48 – 72) bei Auftreten einer langen Periode mit positiver Residuallast kann die Belüftung im Rahmen der FS2 daher langfristig positive Flexibilität bereitstellen. Zudem sind in Abbildung 6-16 die maximalen Abschaltzeiten von 15 Minuten (FS1) und 60 Minuten (FS2) ersichtlich. Der Auslastungsverlauf der FS2 weist, je nach Auftreten der Residuallast, auch Abrufe < 60 Minuten auf (siehe Tag 1, Stunde 0 – 24). Den Abrufen folgt eine Regenerationszeit die der vorangegangenen Abrufdauer entspricht. Innerhalb der ersten 15 Minuten nach einem Abruf ist das Hochfahren der Leistung zur Erhöhung der Sauerstoffzufuhr um 20% erkennbar (siehe Kapitel 5.7.4). Die maximale Leistung der Belüftung liegt damit bei 288 kW<sub>el</sub>. Zusammenfassend bestätigt sich, dass der Zulauf-Grenzwert und die maximale Abschaltdauer inkl. Regenerationszeit ausschlaggebende Faktoren bei der Begrenzung des theoretischen Flexibilitätspotentials darstellen. Diese Erkenntnis ist auf die weiteren flexiblen Aggregate des Reinigungsprozesses übertragbar. Trotz der begrenzenden Faktoren, kann im Szenario 2 mit den ausgewählten Energieverbunden die Residuallast in gewissen Zeitschritten vollständig ausgeglichen werden. Abbildung 6-17 zeigt die Jahresdauerlinien der Residuallast der Zelle 2 „Quartier“, sowie der durch das Szenario 2 je nach Flexibilisierungsstrategie reduzierten Residuallast des Energieverbundes „anARA\_BHKW“ (Zelle 1).



**Abbildung 6-17: Netzdienliches Szenario 2 nach OPTIEVLEX – Jahresdauerlinien der Residuallasten der Zelle 2 vor und nach den ausgleichenden Abrufen von Flexibilität des Energieverbundes „anARA\_BHKW“ (Zelle 1)**

In Abbildung 6-17 ist ersichtlich, dass sich die Jahresdauerlinien der reduzierten Residuallasten Richtung Nulllinie verschieben. Sowohl die positive als auch die negative Residuallast kann im Rahmen beider Flexibilisierungsstrategien reduziert werden. Mit dem Energieverbund „anARA\_BHKW“ kann die Residuallast je nach Flexibilisierungsstrategie in 1.688 (FS1) bzw. 3.232 (FS2) Stunden vollständig ausgeglichen werden. Der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T“ bietet in 1.881 (FS1) bzw. 3.215 (FS2) Stunden und der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ in 890 (FS1) bzw. 3.600 (FS2) Stunden den vollständigen Ausgleich.

6.3.6.3 Detailanalyse zum Szenario 4

Das Szenario 4 nach Abbildung 6-8 kann nur auf den Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ angewandt werden und berücksichtigt die Flexibilisierung des Faulgas-BHKWs, des Produktgas-BHKWs, sowie der flexiblen Lasten des Reinigungsprozesses. Dabei wird das Produktgas-BHKW kontinuierlich über das ganze Jahr hinweg betrieben. Tabelle 6-9 zeigt die Anzahl der 15 min-Abrufe je flexiblem Aggregat und Flexibilisierungsstrategie. Die Abrufe sind die Basis zur Ermittlung der realisierbaren flexiblen Energiemengen nach Abbildung 6-14.

**Tabelle 6-9: Netzdienliches Szenario 4 nach OPTIEVLEX – Anzahl der 15 min-Abrufe in einem Jahr je flexiblem Aggregat der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Flexibilisierungsstrategie (FS)**

Flexibles Aggregat	Anzahl der 15 min-Abrufe nach Energieverbund und FS	
	anARA_BHKW_T_VG-BHKW	
	FS1	FS2
Faulgas-BHKW	4.962	12.632
Produktgas-BHKW	254	2.074
Zulaufpumpwerk	4.122	10.218
Sandfanggebläse	3.953	10.342
Belüftung	4.315	11.508
Rezirkulation	3.986	9.677
Rücklaufschlammpumpe	4.063	9.897

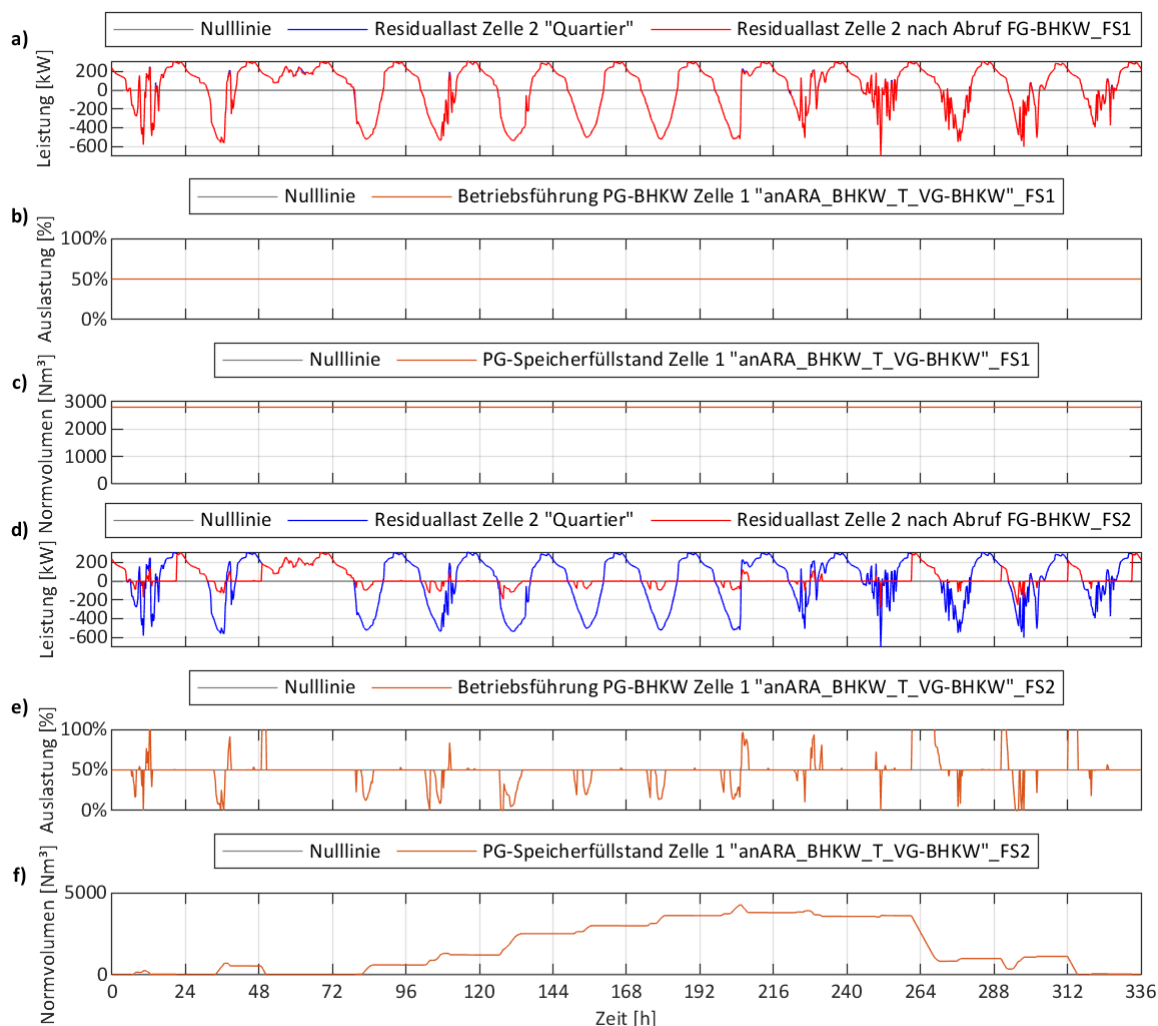
In Tabelle 6-9 wird ersichtlich, dass auch im Szenario 4 nicht wie bei der Ermittlung des theoretischen Flexibilitätspotentials angenommen jeder 15 min-Zeitschritt (= 35.040 Zeitschritte) je Aggregat zur Bereitstellung von Flexibilität genutzt werden kann. Die Erkenntnisse der Detailanalyse des Szenario 2 zur Begrenzung der Flexibilität des Faulgas-BHKWs, sowie der flexiblen Aggregate des Reinigungsprozesses können auf das Szenario 4 übertragen werden. Daher steht folgend die Detailanalyse des Produktgas-BHKWs im Fokus.

BEGRENZUNG DER FLEXIBILITÄT DES PRODUKTGAS-BHKWS

Das Flexibilitätspotential des Produktgas-BHKWs wird zur Verringerung der Eingriffe in den Reinigungsprozess nach dem Potential des Faulgas-BHKWs abgefragt. Damit leitet sich das Jahresbedarfsprofil an netzdienlicher Flexibilität für das Produktgas-BHKW aus der Residuallast nach Abruf des Faulgas-BHKWs ab. Bei 15 min-Zeitschritten mit positiver Residuallast und einem Speicherfüllstand > 0 kann das Produktgas-BHKW positive Flexibilität durch Erhöhung der Leistung bis auf Nennleistung (= 280 kW<sub>el</sub>) bereitstellen. Der Produktgasspeicher füllt sich, wenn Gas im Zuge einer Reduktion der Erzeugung beim Abruf negativer Flexibilität gespeichert wird. Eine Zufeuerung anderer Gase wird analog zum Faulgas-BHKW gemäß Kapitel 6.3.6.2 nicht berücksichtigt.

Neben positiver Flexibilität kann das Produktgas-BHKW negative Flexibilität bereitstellen. Dies erfolgt je nach Höhe der negativen Residuallast mittels Reduktion der Erzeugung bzw. mit einer vollständigen Abschaltung des BHKWs. Das in diesem Zeitschritt nicht der thermischen Verwertung zugeführte Produktgas wird in den Gasspeicher eingeleitet. Da eine Einspeicherung nur vorgenommen werden kann, wenn ausreichend Speicherkapazität zur Verfügung steht, ist die negative Flexibilität durch das Speichervolumen beschränkt.

Um die Ausführungen zu verdeutlichen zeigt Abbildung 6-18 die Residuallast nach Abruf des Faulgas-BHKWs, die Auslastung des Produktgas-BHKWs und den zugehörigen Speicherfüllstand je Flexibilisierungsstrategie für den Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“. Die Verläufe repräsentieren die zwei zu Kapitel 6.3.6.2 analogen exemplarischen Sommerwochen.

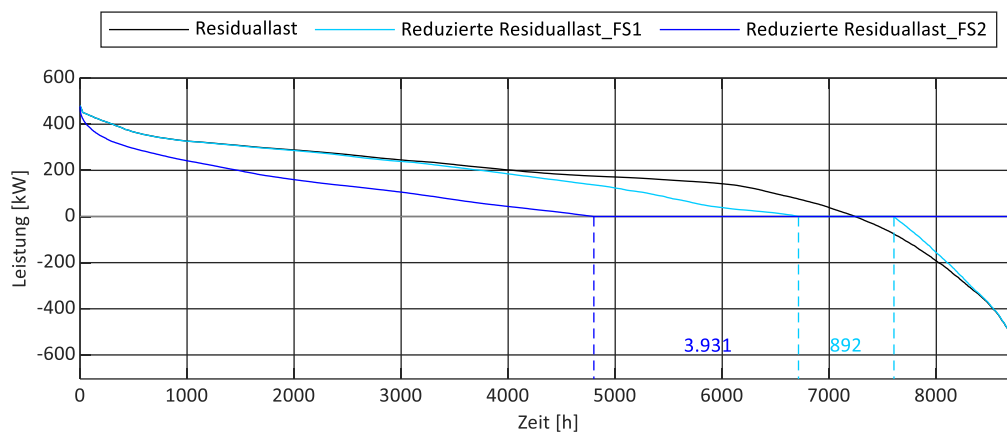


**Abbildung 6-18: Netzdienliches Szenario 4 nach OPTIEVLEX – a) Residuallast der Zelle 2 nach Abruf des Faulgas (FG)-BHKWs, b) Betriebsführung des Produktgas (PG)-BHKWs und c) Produktgasspeicherfüllstand bei Durchführung der FS1, d) Residuallast der Zelle 2 nach Abruf des Faulgas-BHKWs sowie e) Betriebsführung des Produktgas-BHKWs und f) Produktgasspeicherfüllstand bei Durchführung der FS2 für zwei exemplarische Sommerwochen für den Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ (Zelle 1)**

Die in Abbildung 6-18 dargestellten Verläufe der FS1 können zur Erklärung der geringen realisierbaren flexiblen Energiemengen von rund  $210 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-40 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (siehe Abbildung 6-14) im S4 herangezogen werden. Aufgrund der Begrenzung der mittels BHKWs aufbrachten Leistung mit dem Elektrizitätsbedarfsprofil des Energieverbundes, können im Rahmen der FS1 durch die zusätzliche Produktion des Produktgas-BHKWs positive Residuallasten nur geringfügig ausgeglichen werden. Der hohe Leistungsautarkiegrad (= 95 %) führt dazu, dass nur wenig 15 min-Zeitschritte vorliegen, die mit einem Hochfahren der BHKWs über die 50%-Auslastung gemäß Referenzszenario verbunden sind. Das Faulgas-BHKW weist daher nur rund 5.000 (realisierbare Energiemenge: ca.  $45 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-42 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$ ) und das Produktgas-BHKW nur rund 250 (realisierbare Energiemenge: ca.  $1 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-1 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$ ) 15 min-Abrufe auf. Die restlichen Zeitschritte erfolgt ein konstanter Betrieb des Produktgas-BHKWs bei 50%-Auslastung. Dies führt aufgrund der hohen negativen Residuallasten von bis zu  $-704 \text{ kW}_{\text{el}}$  im Sommer zu einem konstant ausgelasteten Faul- und Produktgasspeicher. Im Rahmen der FS1 kann beispielsweise innerhalb der zwei exemplarischen Sommerwochen kein Ausgleich der Residuallast erfolgen.

Die FS2 ist mit rund 12.600 15 min-Abrufen für das Faulgas-BHKW und rund 2.070 Abrufen für das Produktgas-BHKW verbunden. Dies führt zu realisierbaren positiven und negativen Energiemengen von ca.  $317 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (FG-BHKW:  $300 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$ , PG-BHKW:  $17 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$ ) und  $-327 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (FG-BHKW:  $-309 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$ , PG-BHKW:  $-18 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$ ). Die Zahlen zeigen, dass das Produktgas-BHKW negative Flexibilität bietet, was bei längeren Perioden zu Speicherfüllständen von bis zu maximal  $4.270 \text{ Nm}^3$  führt. Das ist auch in Abbildung 6-18 an den Tagen 4 – 11 (Stunden 72 – 264) ersichtlich. Hohe Speicherfüllstände treten jedoch aufgrund der bereits durch die Abrufe des Faulgas-BHKWs stark reduzierten negativen Residuallast nur selten auf. Bei vollständig gefülltem Speicher werden positive Flexibilitäten bis zu 9 Stunden bereitgestellt, beispielsweise erkennbar an den Tagen 11 und 12 (Stunden 240 – 288).

Zusammenfassend betrachtet zeigen beide Flexibilisierungsstrategien nur eine geringe Anzahl von 15 -min-Abrufen für das Produktgas-BHKW. Begründungen dafür sind im Rahmen der FS1 die Begrenzung durch das Bedarfsprofil des Energieverbundes und die Speicherkapazitäten. Im Rahmen der FS2 liegt aufgrund der vorab abgerufenen Flexibilität des Faulgas-BHKWs eine stark reduzierte negative Residuallast der Zelle 2 „Quartier“ vor. Liegt kein negativer Flexibilitätsbedarf vor wird die BHKW-Leistung nicht reduziert und kein Produktgas eingespeichert, welches in Zeitschritten mit positiver Residuallast zur Bereitstellung von positiver Flexibilität (Leistungserhöhung) erforderlich wäre. Die Flexibilisierung des Produktgas-BHKWs führt dennoch zu einer Steigerung der Anzahl an vollständig ausgeglichenen Stunden, was anhand der in Abbildung 6-19 dargestellten Jahresdauerlinien der Residuallasten vor und nach den Abrufen je Flexibilisierungsstrategie erkenntlich ist.



**Abbildung 6-19: Netzdienliches Szenario 4 nach OPTIEVLEX – Jahresdauerlinien der Residuallasten der Zelle 2 vor und nach den ausgleichenden Abrufen von Flexibilität des Energieverbundes „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ (Zelle 1)**

In Abbildung 6-19 ist ersichtlich, dass der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ im Szenario 4 in 892 (FS1) bis 3.931 (FS2) Stunden ausreichend Flexibilität zur vollständigen Deckung der Residuallast bereitstellen kann. Dies stellt im Vergleich zum Szenario 2 eine Steigerung um 0,3 % (FS1) bzw. 9,2 % (FS2) dar.

#### 6.3.6.4 Detailanalyse zum Szenario 6

Gemäß Abbildung 6-8 dient das S6 der Analyse der Auswirkungen eines saisonalen Betriebs des Produktgas-BHKWs auf das realisierbare Flexibilitätspotential. Szenario 6 ist nur auf den Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ anwendbar. Der saisonale Betrieb bedingt, dass das BHKW eine höhere Nennleistung als in den vorhergehenden Szenarien aufweist, um innerhalb der kürzeren Einsatzperiode das anfallende Produktgas verwerten zu können. Im Rahmen der FS1 wird das BHKW im Winter (01.11. – 20.03) betrieben und weist eine Nennleistung von rund 704 kW<sub>el</sub> auf. Bei fünfzigprozentiger BHKW-Auslastung und ohne Abrufe liegt konstant eine Leistung von 352 kW<sub>el</sub> vor. In der FS2 wird das BHKW im Sommer (15.05. – 14.09.) betrieben und besitzt aufgrund der kürzeren Periode eine Nennleistung von rund 802 kW<sub>el</sub>. Mit 50 % BHKW-Auslastung steht konstant eine Leistung von 401 kW<sub>el</sub> zur Verfügung. Das Szenario 6 zeigt die in Tabelle 6-10 dargestellte Anzahl der 15 min-Abrufe je flexiblem Aggregat der Zelle 1 und Flexibilisierungsstrategie. Dabei ergeben sich ähnliche Werte wie in den S2 und S4. Die Begrenzung der Abrufe, ist analog zu den vorab diskutierten Szenarien durch den Einfluss der Speicherkapazitäten, Zulauf-Grenzwerte und Regenerationszeiten bedingt. Die Erkenntnisse zu den flexibilitätsbegrenzenden Faktoren der oben angeführten Detailanalysen sind auf das S6 übertragbar. Daher steht die Detailanalyse des saisonalen Betriebes des Produktgas-BHKWs im Fokus. Das Flexibilitätspotential des Produktgas-BHKWs wird analog zu S4 zur Verringerung der Eingriffe in den Reinigungsprozess nach dem Potential des Faulgas-BHKWs abgefragt.

**Tabelle 6-10: Netzdienliches Szenario 6 nach OPTIEVLEX – Anzahl der 15 min-Abrufe je flexiblem Aggregat der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Flexibilisierungsstrategie (FS)**

Flexibles Aggregat	Anzahl der 15 min-Abrufe nach Energieverbund und FS	
	anARA_BHKW_T_VG-BHKW	
	FS1	FS2
Faulgas-BHKW	12.832	12.632
Produktgas-BHKW	51	1.447
Zulaufpumpwerk	3.744	10.287
Sandfanggebläse	3.444	10.334
Belüftung	4.075	11.581
Rezirkulation	3.566	9.721
Rücklaufschlammpumpe	3.769	9.948

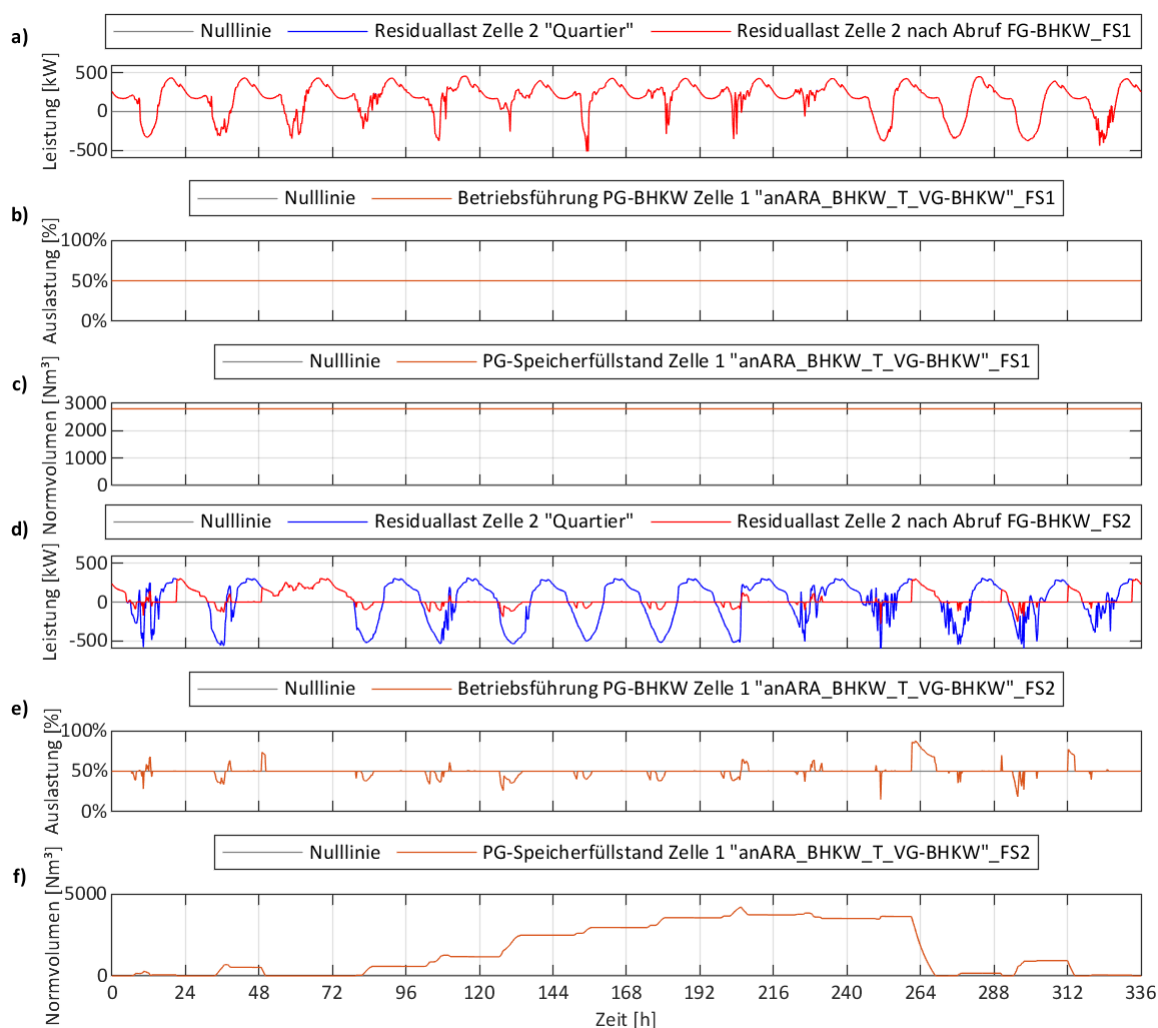
Zur Analyse der Flexibilisierung des Produktgas-BHKW in der jeweiligen Betriebsaison erfolgt in Abbildung 6-20 die Darstellung der Residuallast nach Abruf des Faulgas-BHKWs, der Auslastung des Produktgas-BHKWs und des zugehörigen Speicherfüllstandes je Flexibilisierungsstrategie für den Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“. Die Verläufe repräsentieren für die FS1 zwei exemplarische Winterwochen, die die höchsten negativen Residuallasten der Winterperiode aufweisen. Für die FS2 werden analog zu S2 und S4 die Verläufe der zwei exemplarischen Sommerwochen dargestellt.

Im Rahmen der FS1 liegt mit rund 50 Abrufen, sowie einer positiven und negativen realisierbaren Energiemenge von rund  $0 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-1 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$ , eine geringere Flexibilisierung des Produktgas-BHKWs als in S4 vor. Innerhalb der Winterperiode führt die zusätzliche Produktion des Produktgas-BHKWs zu einem  $\text{LAG}_{\text{el}}$  von 100 %, was bei Begrenzung der BHKW-Maximalleistung mit dem Bedarfsprofil des Energieverbundes dazu führt, dass keine positiven Residuallasten ausgeglichen werden können. Der Abruf negativer Residuallasten erfolgt zu Beginn der Winterperiode innerhalb von 50 15 min-Zeitschritten bis eine vollständige Auslastung der Speicherkapazität eintritt. Die restlichen Zeitschritte liegt wie in Abbildung 6-20 ersichtlich ein konstanter Betrieb bei 50 %-Auslastung vor. Hieraus kann abgeleitet werden, dass das Produktgas-BHKW quasi keinen Beitrag zum Ausgleich der Residuallasten beiträgt. Außerhalb der Winterperiode bedingt der saisonale Einsatz des Produktgas-BHKWs einen  $\text{LAG}_{\text{el}}$  von rund 66 %, was zu 12.832 Abrufen des Faulgas-BHKWs (realisierbare flexible Energiemengen:  $228 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-231 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$ ) führt.

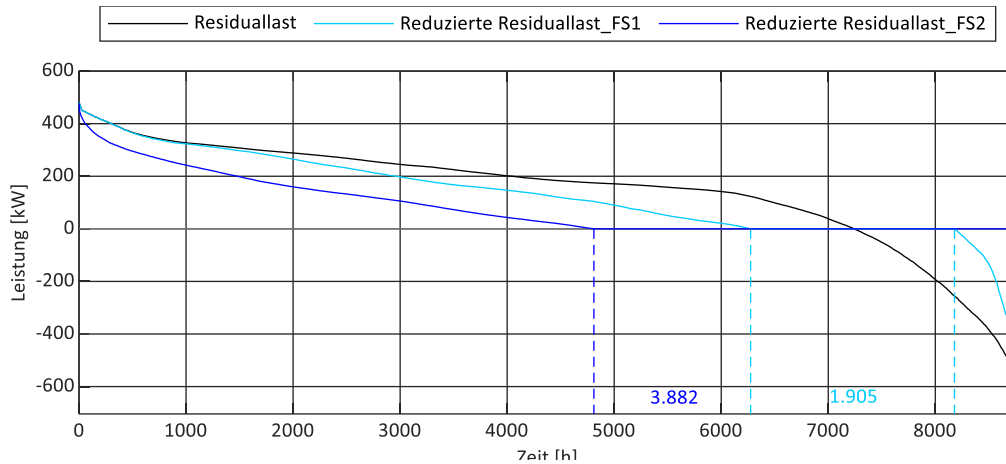
Die FS2 verzeichnet rund 12.600 15 min-Abrufe für das Faulgas-BHKW, sowie rund 1.450 Abrufe für das Produktgas-BHKW und ist mit einer durch die BHKWs bereitgestellten positiven und negativen Energiemenge von rund  $314 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (FG-BHKW:  $300 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$ , PG-BHKW:  $14 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$ ) und  $-324 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (FG-BHKW:  $-309 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$ , PG-BHKW:  $-15 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$ ) verbunden. Die Zahlen zeigen, dass das Produktgas-BHKW ohne Begrenzungen der FS1



positive Flexibilität bieten kann. Voraussetzung dafür ist ein Speicherfüllstand  $> 0$ , welcher nach Bereitstellung negativer Flexibilität vorliegt. Bei längeren Perioden mit negativen Residuallasten können Speicherfüllstände von bis zu maximal  $4.180 \text{ Nm}^3$  auftreten, was in Abbildung 6-18 an den Tagen 4 – 11 (Stunden 72 – 264) ersichtlich ist. Hohe Speicherfüllstände treten jedoch aufgrund der bereits durch die Abrufe des Faulgas-BHKWs stark reduzierten negativen Residuallast nur selten auf. Bei vollständig gefülltem Speicher werden positive Flexibilitäten bis zu 9 Stunden bereitgestellt, beispielsweise erkennbar an den Tagen 11 und 12 (Stunden 240 – 288). Zusammenfassend zeigt sich trotz saisonalem Betrieb, bei beiden Flexibilisierungsstrategien eine geringe Flexibilisierung des Produktgas-BHKWs.



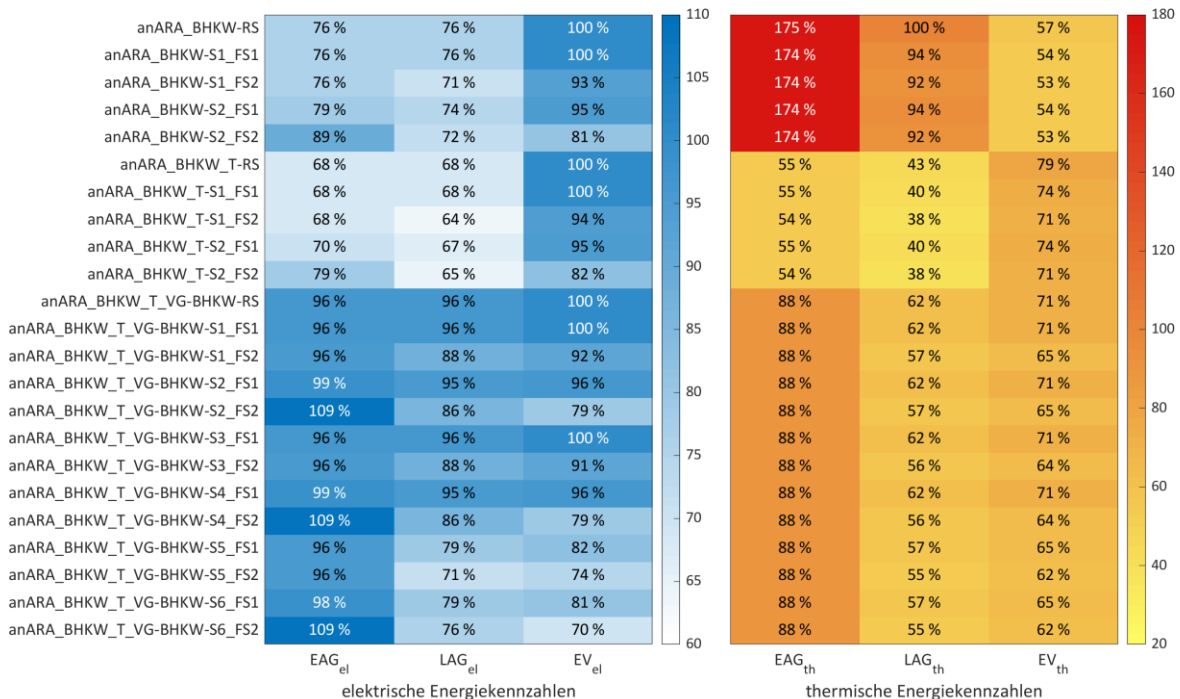
**Abbildung 6-20: Netzdienliches Szenario 6 nach OPTIEVLEX – a) Residuallast der Zelle 2 nach Abruf des Faulgas (FG)-BHKWs, b) Betriebsführung des Produktgas (PG)-BHKWs und c) Produktgasspeicherfüllstand bei Durchführung der FS1 für zwei exemplarische Winterwochen, d) Residuallast der Zelle 2 nach Abruf des Faulgas-BHKWs sowie e) Betriebsführung des Produktgas-BHKWs und f) Produktgasspeicherfüllstand bei Durchführung der FS2 für zwei exemplarische Sommerwochen für den Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ (Zelle 1)**



**Abbildung 6-21: Netzdienliches Szenario 6 nach OPTIEVLEX – Jahresdauerlinien der Residuallasten der Zelle 2 vor und nach den ausgleichenden Abrufen von Flexibilität des Energieverbundes „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ (Zelle 1)**

In Abbildung 6-21 wird anhand der Jahresdauerlinien der Residuallasten ersichtlich, dass der saisonale Betrieb und die saisonale Flexibilisierung des Produktgas-BHKWs im Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ mit 1.905 (FS1) bis 3.882 (FS2) vollständig ausgeglichenen Stunden verbunden ist. Dies stellt im Vergleich zum S2 eine Steigerung um 114,1% (FS1) bzw. 7,8 % (FS2) dar. Im Vergleich zum S4 erfolgt eine Steigerung im Rahmen der FS1 von 213,6 %, sowie eine Reduktion bei Durchführung der FS2 von rund 1,3 %.

6.3.6.5 *Energiekennzahlen der Zelle 1 „Energieverbund“*



**Abbildung 6-22: Netzdienliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Energiekennzahlen der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario (RS)**

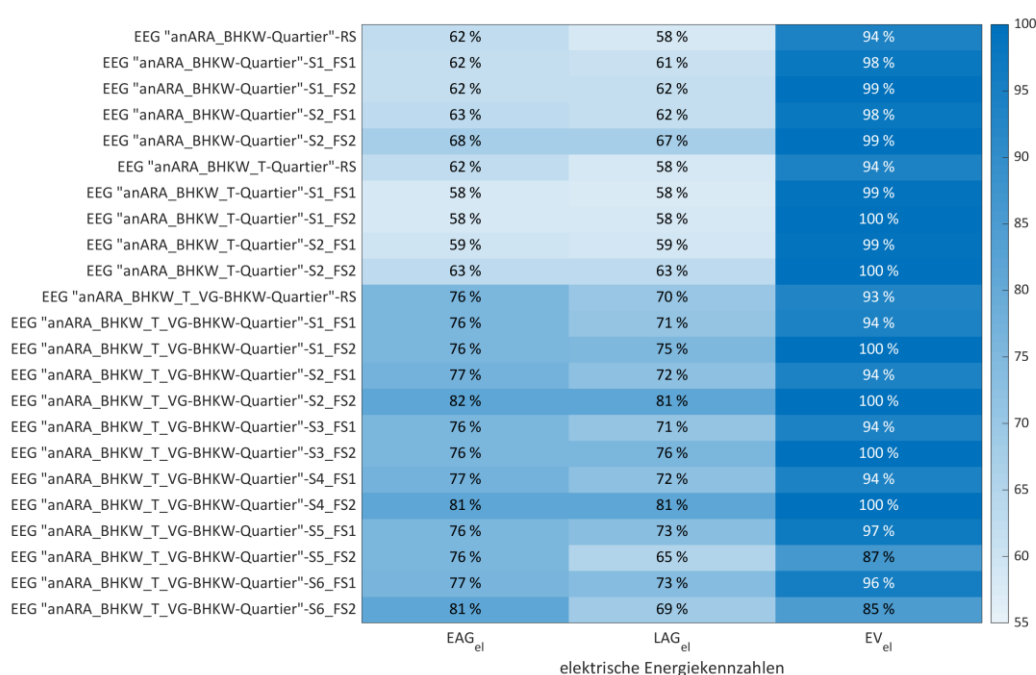
Die Detailanalysen in den Kapiteln 6.3.6.2 bis 6.3.6.4 zeigen, dass die Betriebsführung der flexiblen Lasten des Reinigungsprozesses, sowie der flexiblen Energieaufbringungseinheiten durch die Bereitstellung von netzdienlicher Flexibilität beeinflusst wird. Dies führt dazu, dass die Flexibilisierung das elektrische und thermische Jahreslast- und -aufbringungsprofil des jeweiligen Energieverbundes (Zelle 1) verändert. Zur Quantifizierung der Veränderungen können die Energiekennzahlen Energie- (EAG) und Leistungsautarkiegrad (LAG), sowie Eigenverbrauchsanteil (EV) nach Kapitel 5.2 herangezogen werden. Abbildung 6-22 illustriert die elektrischen und thermischen Energiekennzahlen für die ausgewählten Energieverbunde nach Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS). Zudem werden die Energiekennzahlen des Referenzszenarios (RS) zu Vergleichszwecken dargestellt. Die Energiekennzahlen des RS und die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden in Kapitel 6.3.5.2 erläutert.

Die Steuerung der flexiblen Lasten in S2, S4 und S6 führt bei beiden FS zu einer Erhöhung des  $EAG_{el}$ . Dies ist auf das Rückfahren bzw. Abschalten des Sandfanggebläses und der Belüftung, und der damit verbundenen Reduktion des Gesamtelektrizitätsbedarfs, zurückzuführen. Die Senkung des  $LAG_{el}$  und  $EV_{el}$  ist durch das Hochfahren der Pumpen und Belüftung in den Regenerationszeiten bedingt. Die erhöhte Leistung kann in diesen Zeitschritten nicht durch die ARA-interne Elektrizitätsaufbringung gedeckt werden. Dies trifft vor allem auf das S6 zu, da hier nur in einer Saison eine Energieaufbringung mittels Produktgas-BHKW zur Verfügung steht. Die thermischen Energiekennzahlen zeigen bei der FS2 im S2 und S4 eine Reduktion des  $LAG_{th}$  und  $EV_{th}$ . Dies weist darauf hin, dass die Flexibilisierung der Aufbringungseinheiten zu einer Verschiebung der Energieaufbringung außerhalb der Betriebszeiten des Trockners führen. Die etwas höhere Reduktion im S6 ist wiederum auf den saisonalen Betrieb des Produktgas-BHKWs zurückzuführen. Hier gilt zu erwähnen, dass die FS2 generell zu einer stärkeren Zunahme des  $EAG_{el}$ , sowie Abnahme des  $LAG_{el}$ ,  $EV_{el}$ ,  $LAG_{th}$  und  $EV_{th}$  führt.

Das S1 und das S3 weisen aufgrund der reinen Flexibilisierung der Aufbringungseinheiten im Rahmen der FS1 keine Veränderungen der elektrischen Energiekennzahlen auf. Dies ist dadurch bedingt, dass die flexiblen Aufbringungseinheiten nicht über den Elektrizitätsbedarf des Energieverbundes hinaus hochgefahren werden. Bei saisonalem Betrieb des Produktgas-BHKWs (S5) zeigt sich jedoch eine Senkung des  $LAG_{el}$  und  $EV_{el}$ , welche im Rahmen der FS2 noch verstärkt wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass außerhalb der Betriebssaison des Produktgas-BHKWs lediglich ein  $LAG_{el}$  von 62 % (FS1) bzw. 55 % (FS2) erreicht wird. Die FS2 weist neben dem S5 auch im S1 und im S3 eine Senkung des  $LAG_{el}$  und  $EV_{el}$  auf. Dies ist darin begründet, dass negative Residuallastspitzen der Zelle 2 häufig mit Bedarfsspitzen der Zelle 1 zusammenfallen bzw. positive Residuallastspitzen in Zeitschritten mit niedrigem Elektrizitätsbedarf vorliegen und bei der FS2 eine möglichst hohe Deckung der Residuallast angestrebt wird. Die thermischen Kennzahlen zeigen analoge Entwicklungen wie in S2 - S6.

### 6.3.6.6 Energiekennzahlen der Zelle 1 „Energieverbund“ und der Zelle 2 „Quartier“ als Erneuerbare-Energiegemeinschaft „Energieverbund-Quartier“

Die Betrachtung der Energiekennzahlen der Erneuerbaren-Energiegemeinschaft (EEG) liefert Erkenntnisse über deren Effizienz hinsichtlich des Ausgleiches regionaler Residuallasten. Vor allem der  $LAG_{el}$  und der  $EV_{el}$  geben darüber Auskunft und werden daher nachfolgend fokussiert. Ein  $LAG_{el}$  von 100 % bedeutet, dass sich das elektrische Jahreslast- und -aufbringungsprofil der EEG vollständig decken. Ein  $EV_{el}$  von 100 % weist darauf hin, dass die in der EEG aufgebrauchte elektrische Energie vollständig innerhalb der EEG zur Bedarfsdeckung verwendet wird. Die Energiekennzahlen der EEG „Energieverbund-Quartier“ nach Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS) sind in Abbildung 6-23 ersichtlich.



**Abbildung 6-23: Netzdienliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Energiekennzahlen der Erneuerbaren Energiegemeinschaft „Energieverbund (Zelle 1) – Quartier (Zelle 2)“ nach Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario (RS)**

Abbildung 6-23 zeigt, dass der EEG mit dem Energieverbund „anARA\_BHKW“ im S1 und S2 bei beiden Flexibilisierungsstrategien (FS1 und FS2) zur Erhöhung des  $LAG_{el}$  und des  $EV_{el}$  führen. Dabei wird bis zu 99 % der in der EEG aufgebrauchten Elektrizität intern genutzt. Hervorzuheben ist das S2\_FS2. Hier führen die unbegrenzten Speicherkapazitäten und die unbegrenzten Leistungserhöhungen bis auf Nennlast beim Faulgas-BHKWs in Kombination mit den Lastreduktionen bei den flexiblen Lasten im Reinigungsprozess zu den höchsten realisierbaren flexiblen Energiemengen des Energieverbundes „anARA\_BHKW“ (siehe Abbildung 6-14) und damit zu einem  $LAG_{el}$  von 67 % (+9 % absolut).

Diese Erkenntnisse können auf den EEG „anARA\_BHKW\_T-Quartier“ übertragen werden. Die niedrigeren Kennzahlen im Vergleich zum EEG „anARA\_BHKW-Quartier“ sind auf den zusätzlichen Elektrizitätsbedarf des Trockners und das dadurch verschobene elektrische Lastprofil des Energieverbundes zurückzuführen.

Der EEG „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW-Quartier“ weist bei Durchführung der FS1 bei allen Szenarien gesteigerte  $LAG_{el}$  von bis zu 73 % (+3 % absolut) und  $EV_{el}$  von bis zu 97 % (+4 % absolut) auf. Bei Durchführung der FS2 werden in den Szenarien 1 bis 4 ebenfalls höhere  $LAG_{el}$  und  $EV_{el}$  als im Referenzszenario erreicht. Beispielsweise führt die zusätzliche Steuerung der flexiblen Lasten (S2 und S4) zu einem  $LAG_{el}$  von 81% (+11 % absolut) und einem  $EV_{el}$  von 100 % (+7 % absolut). Hervorzuheben sind die Kennzahlen zu den Szenarien 5 und 6 bei Umsetzung der FS2. Trotz dem Ziel einer möglichst hohen Residuallastdeckung bei der FS2 liegen ein im Vergleich zum RS gesunkener  $LAG_{el}$  bzw.  $EV_{el}$  vor. Dies ist darauf zurückzuführen, dass außerhalb der Betriebssaison des Produktgas-BHKWs lediglich ein  $LAG_{el}$  von rund 50 % (S5) bzw. 55 % (S6) erreicht wird.

### *6.3.6.7 Kostenkennzahlen der Zelle 1 „Energieverbund“ und der Zelle 2 „Quartier“ als Erneuerbare-Energiegemeinschaft „Energieverbund-Quartier“*

Die Bereitstellung von netzdienlicher Flexibilität ist mit zusätzlichen Investitionsausgaben (Capex) und fixen Betriebskosten ( $Opex_{fix}$ ) für Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), welche für die Interaktion innerhalb der EEG benötigt wird, verbunden. Zudem kann eine Flexibilisierung der Energieaufbringungseinheiten zusätzliche Gasspeicherkapazitäten erfordern. So zeigen beispielsweise die vorab erläuterten Analyseergebnisse der netzdienlichen Szenarien, dass bei Durchführung der FS2 ohne Speicherbegrenzung eine Erhöhung der Speicherfüllstände auftritt und die maximale erforderliche Speicherkapazität zunimmt. Diese Zunahme ist ebenfalls mit zusätzlichen Investitionsausgaben (Capex) und fixen Betriebskosten ( $Opex_{fix}$ ) für Speichererweiterungen verbunden. Weitere Kostenänderungen ergeben sich aus veränderten Jahreslast- und -aufbringungsprofilen und der damit zusammenhängenden Änderung der Energiekennzahlen. Führt die Bereitstellung von Flexibilität zu einer Änderung des  $LAG_{el}$  oder des  $LAG_{th}$  wirkt sich dies auch auf die variablen Betriebskosten ( $Opex_{variabel}$ ) für extern zugekaufte elektrische und thermische Energie aus. Dabei steigen die Kosten bei sinkendem LAG und vice versa.

Die Auswirkungen einer Teilnahme an einer regionalen EEG nach dem Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz [5] auf die Kostencharakteristika werden für die Zelle 1 „Energieverbund“ und die Zelle 2 „Quartier“ nachfolgend einer Detailanalyse unterzogen. Den Berechnungen liegen dabei die in Tabelle 6-11 gelisteten Strompreise und Einspeisetarife zugrunde. Der Strompreis und Einspeisetarif innerhalb der EEG ergibt sich auf Basis des Strompreises für

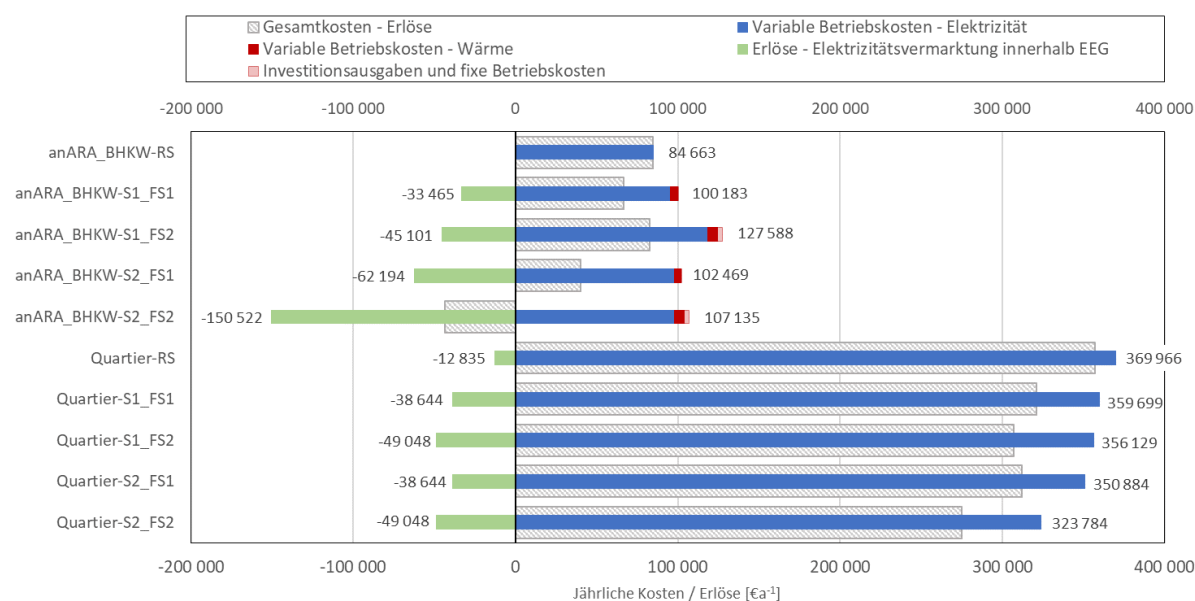
Haushaltskunden nach Reduktion des Netzentgeltes (regionale EEG = -30%), sowie Abzug des Erneuerbaren-Förderbeitrags und der Elektrizitätsabgabe für PV-Strom.

**Tabelle 6-11: Netzdienliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Strompreise und Einspeisetarife zur Berechnung der Kostenkennzahlen für die Erneuerbaren-Energiegemeinschaften (EEG) „Energieverbund-Quartier“**

Strompreis/Einspeisetarif	Einheit	Wert	Quelle
Strompreis Netz – Quartier	CentkWh <sup>-1</sup>	22,83	[102]
Strompreis Netz – Energieverbund	CentkWh <sup>-1</sup>	11,93	[102]
Strompreis EEG	CentkWh <sup>-1</sup>	17,47	[141]
Einspeisetarif Netz	CentkWh <sup>-1</sup>	3,91	[140]
Einspeisetarif EEG	CentkWh <sup>-1</sup>	17,47	[141]

Abbildung 6-24 bis Abbildung 6-26 zeigen die für die Detailanalyse erforderlichen Kosten- (Investitionsausgabe, fixe und variable Betriebskosten) und Flexibilitätskennzahlen (Erlöse aus der Flexibilitätsbereitstellung) je EEG „Energieverbund-Quartier“. Hier gilt zu beachten, dass nur die durch die Flexibilisierung beeinflussten Kostenbestandteile illustriert werden. Die variablen Betriebskosten für die Entsorgung, sowie die Investitionsausgaben und fixen Betriebskosten für die Anlagenerweiterung gemäß Referenzszenario (RS) (siehe Abbildung 6-13) werden nicht in die Analysen einbezogen, da diese keine Veränderungen bei Bereitstellung von Flexibilität aufweisen. Die Zahlen geben die Gesamtkosten bzw. Erlöse wieder und die grau schraffierten Balken stellen die Gesamtkosten abzüglich der Erlöse dar.

**DETAILANALYSE ERNEUERBARE-ENERGIEGEMEINSCHAFT „ANARA\_BHKW-QUARTIER“**



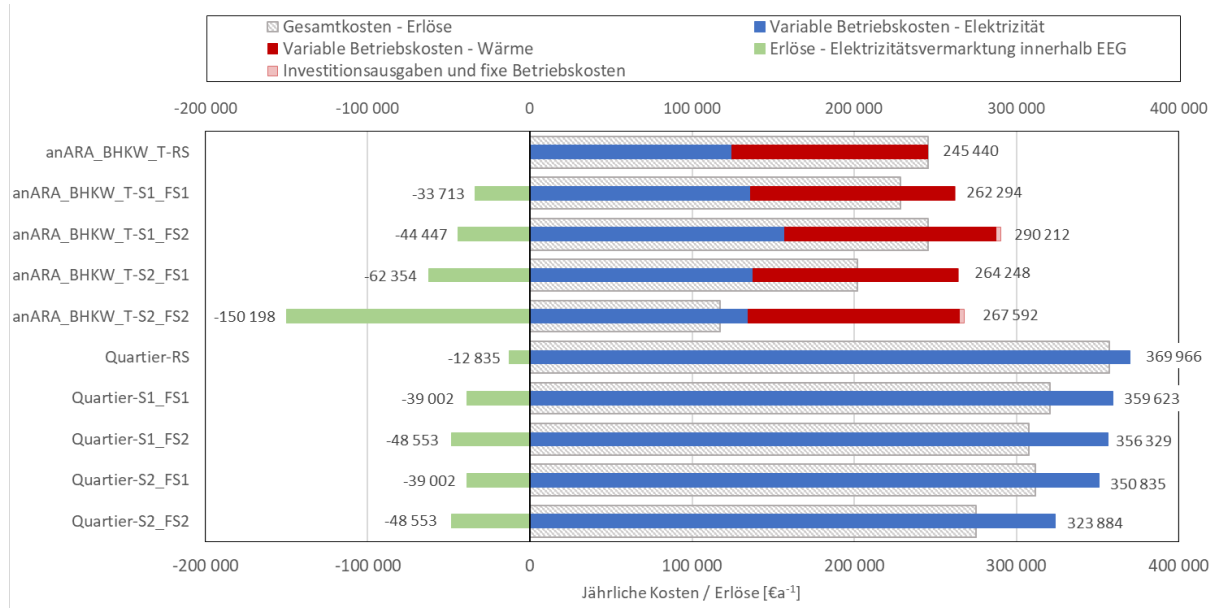
**Abbildung 6-24: Netzdienliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Kostenkennzahlen der Erneuerbaren-Energiegemeinschaft „anARA\_BHKW (Zelle 1) – Quartier (Zelle 2)“ nach Bereitstellung von Flexibilität durch die Zelle 1 je Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS)**

In Abbildung 6-24 ist ersichtlich, dass die netzdienlichen Szenarien mit höheren Gesamtkosten für die Zelle 1 „anARA\_BHKW“ als das RS verbunden sind. Hinsichtlich der Zelle 1 steht der durch die Bereitstellung von Flexibilität sinkende  $LAG_{el}$  (siehe Abbildung 6-22) in einem direkten Zusammenhang mit der Erhöhung des Anteils der extern zugekauften Energiemenge an der benötigten Energiemenge. Dies führt zu einer Zunahme der variablen Betriebskosten für Elektrizität und Wärme. Die Zunahme der Kosten ist zudem durch den höheren Strompreis innerhalb des EEG begründet (siehe Tabelle 6-11), da ein Teil der Elektrizität nicht aus dem Netz sondern aus der Zelle 2 „Quartier“ zugekauft wird. Die aus der Zelle 2 bezogene Energiemenge entspricht dabei der negativen flexiblen Energiemenge gemäß Abbildung 6-14. Gemäß Abbildung 6-24 steigen die Elektrizitätskosten im Vergleich zum RS um bis zu 40 %. Im RS wird der Wärmedarf ARA-intern gedeckt, womit keine Wärmekosten vorliegen. In den netzdienlichen Szenarien treten durch Senkung des  $LAG_{th}$  Wärmekosten von bis zu  $6.080 \text{ €a}^{-1}$  auf. Die zusätzlichen Investitionskosten liegen bei Durchführung der FS1 in beiden Szenarien bei rund  $430 \text{ €a}^{-1}$  für die Integration der IKT. Die FS2 ist in beiden Szenarien mit zusätzlichen Investitionskosten für Speichererweiterungen von rund  $2.700 \text{ €a}^{-1}$  (ca. +  $410 \text{ Nm}^3$  Kapazität) verbunden. Trotz erhöhter Gesamtkosten kann die Teilnahme an einer EEG wirtschaftliche Anreize für den Energieverbund „anARA\_BHKW“ bieten. Durch die Vermarktung der positiven flexiblen Energiemenge nach Abbildung 6-14 können Erlöse generiert werden, welche nach Abzug, die Gesamtkosten sogar unter das Niveau des RS senken (grau schraffierte Balken). Im S2\_FS2 übersteigen die Erlöse, aufgrund der positiven realisierbaren Energiemenge von rund  $860 \text{ MWh}_{el}\text{a}^{-1}$  (siehe Abbildung 6-14), sogar die Gesamtkosten. Die überschüssigen Erlöse könnten hier zur Amortisation von Anlagenerweiterungen beitragen.

Hinsichtlich der Zelle 2 „Quartier“ führen die netzdienlichen Szenarien zu sinkenden Elektrizitätskosten, da ein Teil der extern zugekauften Energiemenge nicht vom Netz sondern von der Zelle 1 zum niedrigeren EEG-Strompreis bezogen werden kann (siehe Tabelle 6-11). Zudem sind durch die Bereitstellung der PV-Überschüsse an die Zelle 1 Erlöse erzielbar, welche zur Deckung der Gesamtkosten beitragen. Zusammenfassend zeigen alle Szenarien geringere Gesamtkosten als das RS, womit die Teilnahme an einer EEG auch für die Zelle 2 einen finanziellen Anreiz bietet.

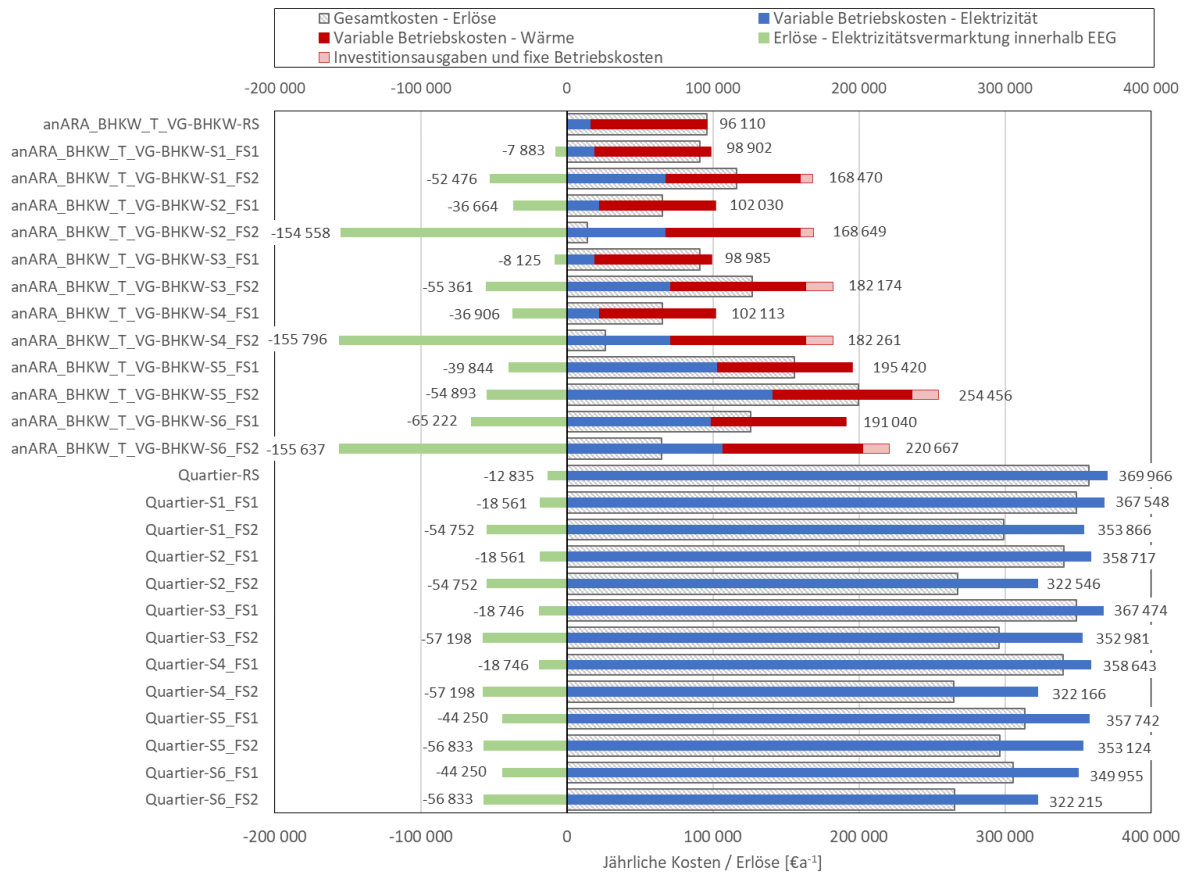
### DETAILANALYSE ERNEUERBARE-ENERGIEGEMEINSCHAFT „ANARA BHKW T-QUARTIER“

Abbildung 6-25 zeigt, dass die Erkenntnisse aus der Analyse der Kostenkennzahlen der EEG „anARA\_BHKW-Quartier“ auf die Kostenkennzahlen der EEG „anARA\_BHKW\_T-Quartier“ übertragbar sind. Der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T“ weist höhere Gesamtkosten auf, da die Klärschlamm-trocknung höhere Elektrizitäts- und Wärmekosten verursacht. Auch hier kann zusammenfassend abgeleitet werden, dass die Bildung einer EEG für beide Zellen monetäre Anreize bieten kann.



**Abbildung 6-25: Netzdienliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Kostenkennzahlen der Erneuerbaren-Energiegemeinschaft „anARA\_BHKW\_T (Zelle 1) – Quartier (Zelle 2)“ nach Bereitstellung von Flexibilität durch die Zelle 1 je Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS)**

**DETAILANALYSE ERNEUERBARE-ENERGIEGEMEINSCHAFT “ANARA BHKW T VG-BHKW-QUARTIER”**



**Abbildung 6-26: Netzdienliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Kostenkennzahlen der Erneuerbaren-Energiegemeinschaft „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW (Zelle 1) – Quartier (Zelle 2)“ nach Bereitstellung von Flexibilität durch die Zelle 1 je Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS)**



Bei Betrachtung der Abbildung 6-25 wird deutlich, dass bei Bildung einer EEG mit dem Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ (Zelle 1) nicht alle netzdienlichen Szenarien einen finanziellen Anreiz für die Zelle 1 bieten. Dies ist vor allem auf die starke Zunahme der Elektrizitätskosten, sowie auf die zusätzlichen Investitionskosten für die IKT und die Erweiterung der Speicherkapazitäten zurückzuführen. Die Bereitstellung von Flexibilität führt beispielsweise in den S1 – S4 bei Durchführung der FS2 zu einer Erhöhung der Elektrizitätskosten von rund 320 %. Die Wärmekosten hingegen steigen nur um rund 15 %. Die Investitionskosten liegen im S1 und S2 bei rund 8.500 €a<sup>-1</sup> (ca. +1.300 Nm<sup>3</sup> Faulgas-Speicherkapazität), während im S3 und S4 die Investitionskosten, aufgrund der zusätzlichen Produktgas-Speicherkapazitäten (ca. +1.500 Nm<sup>3</sup>), bei rund 18.200 €a<sup>-1</sup> liegen. In den Szenarien 5 und 6 führt die FS1 zu einer Zunahme der Elektrizitätskosten von rund 510 %, während die FS2 mit Erhöhungen von bis zu 750 % (S5\_FS2) verbunden ist. Die Wärmekosten weisen in beiden Szenarien eine Erhöhung auf (FS1: +15 %, FS2: +20 %). Die Investitionskosten von rund 17.700 €a<sup>-1</sup> im Rahmen der FS2 sind auf die Integration erforderlicher IKT und die Erweiterung der Faulgas- (ca. +1300 Nm<sup>3</sup>) und Produktgas-Speicherkapazitäten (ca. +1.400 Nm<sup>3</sup>) zurückzuführen. Die Erhöhung der Elektrizitätskosten ergibt sich aus einem sinkenden LAG<sub>el</sub>. Die Gründe für die Abnahme werden im Kapitel 6.3.6.5 erläutert. Die durch die Vermarktung der positiven realisierbaren Energiemenge nach Abbildung 6-14 generierten Erlöse, können auch beim Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ die Gesamtkosten sogar unter das Niveau des RS senken (S1/S2/S3/S4\_FS1, S2/S4/S6\_FS2). Die Gesamtkosten nach Abzug der Erlöse werden durch die grau schraffierten Balken illustriert. Bei Betrachtung dieser zeigt das S2\_FS2 die geringsten jährlichen Kosten und bietet damit den größten finanziellen Anreiz.

Hinsichtlich der Zelle 2 „Quartier“ führen alle netzdienlichen Szenarien zu sinkenden Elektrizitätskosten, da ein Teil der extern zugekauften Energiemenge nicht vom Netz sondern von der Zelle 1 zum niedrigeren EEG-Strompreis bezogen werden kann (siehe Tabelle 6-11). Die aus der Zelle 1 bezogene Energiemenge entspricht dabei der positiven flexiblen Energiemenge gemäß Abbildung 6-14. Zudem sind durch die Bereitstellung der PV-Überschüsse an die Zelle 1 Erlöse erzielbar, welche zur Deckung der Gesamtkosten beitragen. Zusammenfassend zeigen alle Szenarien geringere Gesamtkosten als das RS, womit die Teilnahme an einer EEG neben der Zelle 1 auch für die Zelle 2 einen finanziellen Anreiz bietet.

### 6.3.7 Analyseergebnisse: Systemdienliche Szenarien

Die systemdienlichen Szenarien dienen der Ermittlung des Potentials der ausgewählten Energieverbunde als Flexibilitätsdienstleister zur Bereitstellung von Sekundär- und Tertiärregelenergie, sowie der damit erzielbaren Erlöse. Die detaillierten Annahmen zu den Kennzahlen, sowie zu den Leistungs- und Arbeitspreisen sind dem Kapitel 5.2 zu entnehmen. Die Systemgrenzen der Analyse 4 werden gemäß Kapitel 5.7.1 angewendet. Die Zelle 1 repräsentiert damit den energietechnisch optimierten Energieverbund „anARA\_BHKW“, „anARA\_BHKW\_T“ oder „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“, und die Zelle 2 bildet das Jahresbedarfsprofil an systemdienlicher Flexibilität des Übertragungsnetzbetreibers ab.

Im Rahmen der Analyseergebnisse wird in den Kapiteln 6.3.7.1 und 6.3.7.2 untersucht wie ausgleichende Energiemengen im  $GWh_{el}$ -Bereich (siehe Abbildung 5-35) die Anzahl an Abrufen der flexiblen Aggregate des Energieverbundes und die realisierbaren flexiblen Energiemengen beeinflussen. Da die dem Zulaufprofil hinterlegten Regendaten das Jahr 2014 widerspiegeln, und um einen Vergleich mit den netzdienlichen Szenarien, welche auf Daten des Jahres 2014 basieren, zu ermöglichen, wird nachfolgend das Jahr 2014 detailliert analysiert. Aufgrund des Zieles der vorliegenden Dissertation, liegen die elektrischen Last- und Aufbringungsprofile, sowie die elektrischen Flexibilitätspotentiale und Kennzahlen im Fokus. Die Auswirkungen der Bereitstellung von systemdienlicher Flexibilität durch die Zelle 1 „Energieverbund“ auf deren Energiecharakteristika werden in Kapitel 6.3.7.3 näher betrachtet. Die durch die Bereitstellung auftretenden Kosten und erreichbaren Erlöse werden in Kapitel 6.3.7.4 detailliert untersucht.

#### 6.3.7.1 Realisierbare flexible Energiemenge der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Szenarien

Die Resultate in Abbildung 6-27 stellen die bereitgestellte Sekundär- und Tertiärregelenergie je Energieverbund und Flexibilisierungsstrategie (FS) für das Szenario (S) 7 und 8 für das Jahr 2014 dar. Bei Betrachtung der Resultate sind Analogien zu den netzdienlichen Szenarien erkennbar. Beispielsweise weist die FS1 aufgrund des Trochenwetterzulaufgrenzwertes, der Begrenzung der BHKW-Maximalleistung mit dem ARA-internen Elektrizitätsbedarfsprofil und der begrenzten Speicherkapazitäten in den netz- und systemdienlichen Szenarien niedrigere realisierbare flexible Energiemengen als die FS2 auf. Für eine detaillierte Erläuterung der Hintergründe wird auf das Kapitel 6.3.6.1 verwiesen. Nachfolgend geben die realisierbaren Energiemengen der systemdienlichen Szenarien im Vergleich zu jenen der netzdienlichen Szenarien (siehe Abbildung 6-14) einen Eindruck, inwieweit ein höherer Flexibilitätsbedarf das realisierbare Flexibilitätspotential beeinflusst.

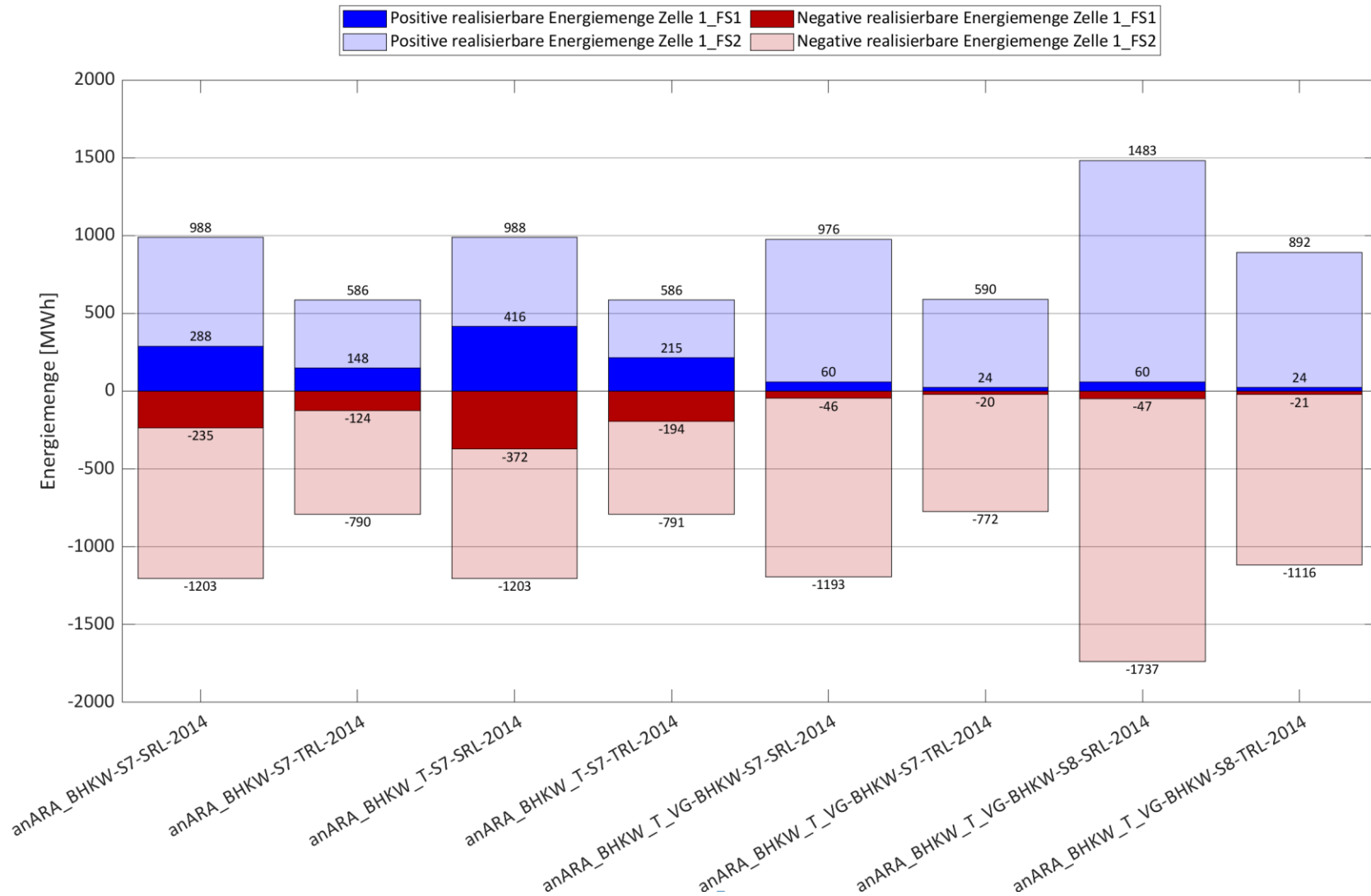


Abbildung 6-27: Systemdienliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Jährliche realisierbare positive und negative elektrische Energiemenge der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Szenario (S)

Anhand der in Abbildung 6-27 dargestellten Resultate wird ersichtlich, dass im Rahmen der systemdienlichen Szenarien eine Flexibilisierung des Faulgas-BHKWs (S7 und S8) mit bis zu viermal höheren realisierbaren flexiblen Energiemengen verbunden ist als im Zuge der netzdienlichen Szenarien (siehe Abbildung 6-14). Hier gilt es vor allem das S1 und S3 für den Vergleich heranzuziehen, da diese Szenarien ebenfalls die Flexibilisierung der Energieaufbringungseinheiten betrachten. Beispielsweise stellt der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ bei Durchführung der FS2 im S1 eine positive und negative Energiemenge von rund  $300 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-309 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  bereit. Währenddessen ist das S7 mit einer positiven und negativen Energiemenge zur Bereitstellung von Regelleistung von  $988 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-1.203 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (SRL) bzw.  $590 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-772 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (TRL) verbunden. Unter Einbezug der theoretischen flexiblen positiven und negativen Energiemenge des Faulgas-BHKWs von rund  $2.484 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-2.246 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  zeigt sich im Vergleich zu dem S1 (positiv: 12,1 %, negativ: 13,8 %) bei dem S7 (positiv: 39,8 % (SRL) und 23,8 % (TRL), negativ: 53,6 % (SRL) und 34,4 % (TRL)) ein höherer Ausnutzungsgrad. Die zusätzliche Flexibilisierung eines über das Jahr konstant betriebenen Produktgas-BHKWs führen im S3 bei Durchführung der FS2 zu einer positiven und negativen Energiemenge von rund  $317 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-327 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$ . Im S8 liegen hingegen realisierbare flexible Energiemengen zur Bereitstellung systemdienlicher Flexibilität von  $1.483 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-1.737 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (SRL) bzw.  $892 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-1.116 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (TRL) vor. Das Produktgas-BHKW weist damit im S8 mit  $507 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-544 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (SRL) bzw.  $302 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-344 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (TRL) höhere realisierbare positive und negative Energiemengen auf als im S3 ( $17 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-18 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$ ). Im Vergleich zu der theoretischen flexiblen positiven und negativen Energiemenge des Produktgas-BHKWs von  $1.268 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-1.184 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  ergeben sich im S8 Ausnutzungsgrade von 40,0 % (positive SRL) und 46,0 % (negative SRL) bzw. 23,8 % (positive TRL) und 29,1 % (negative TRL). Das netzdienliche S3 weist dagegen Ausnutzungsgrad von 1,3 % (positiv) und 1,4 % (negativ) auf. Um die Parameter zu ermitteln, die zu den höheren Ausnutzungsgraden führen, wird eine detaillierte Analyse des S8 vorgenommen.

#### 6.3.7.2 Detailanalyse zum Szenario 8

Das S8 nach Abbildung 6-8 kann auf den Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ angewandt werden und analysiert die systemdienliche Flexibilisierung der Energieaufbringungseinheiten. Sowohl das Faulgas- als auch das Produktgas-BHKW werden ganzjährig betrieben und stehen kontinuierlich für Abrufe zur Verfügung. Tabelle 6-12 zeigt die Anzahl der 15 min-Abrufe je Flexibilisierungsstrategie für das Jahr 2014.

**Tabelle 6-12: Systemdienliches Szenario 8 nach OPTIEVLEX – Anzahl der 15 min-Abrufe je flexiblem Aggregat der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Flexibilisierungsstrategie (FS)**

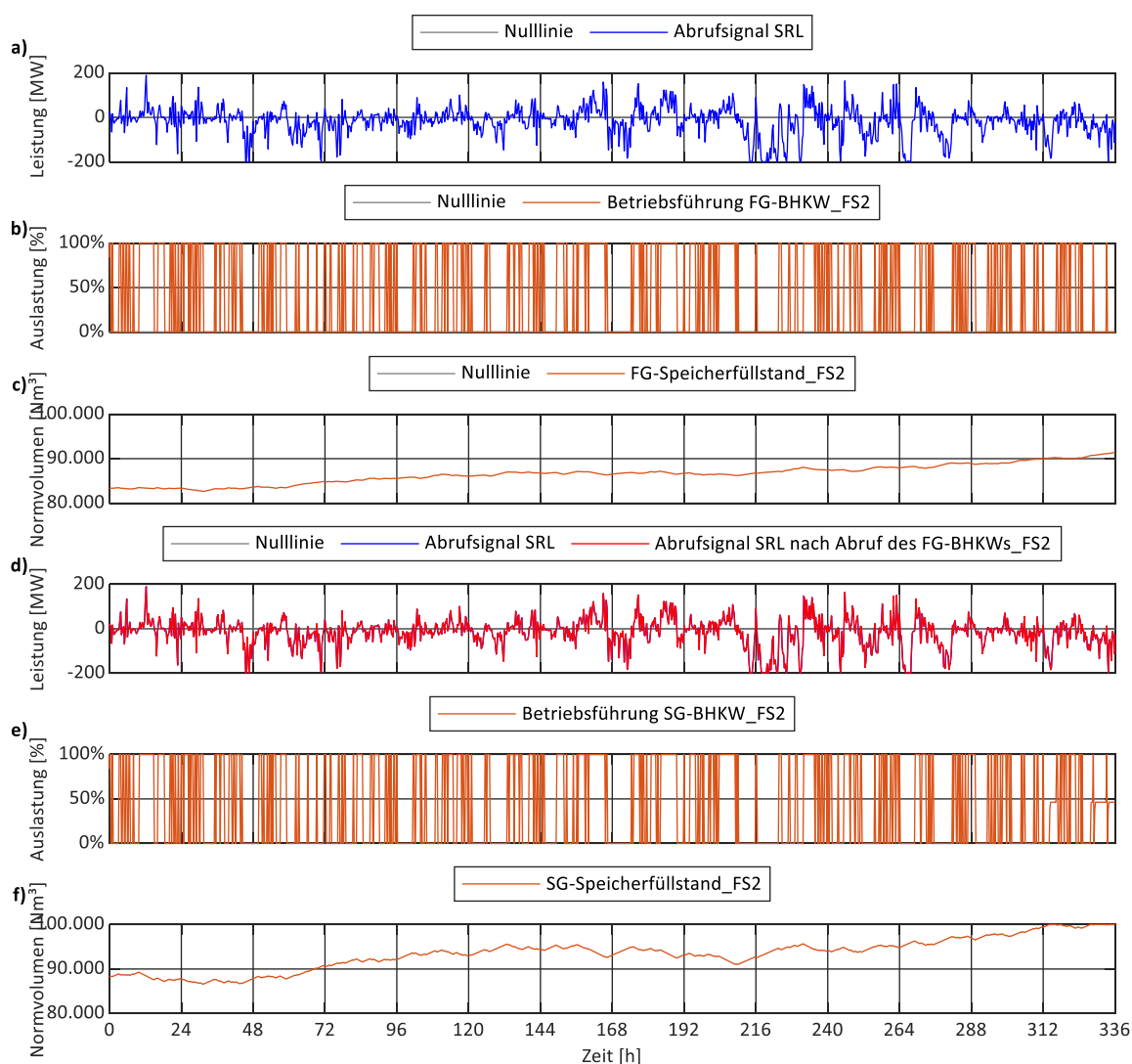
Flexibles Aggregat	Anzahl der 15 min-Abrufe nach Energieverbund und FS			
	anARA_BHKW_T_VG-BHKW			
	FS1		FS2	
	SRL	TRL	SRL	TRL
Faulgas-BHKW	5.238	2.448	33.149	20.746
Produktgas-BHKW	111	66	30.641	18.744

In Tabelle 6-12 ist ersichtlich, dass die FS1 aufgrund der Begrenzung der BHKW-Maximalleistungen mit dem Elektrizitätsbedarfsprofil des Energieverbundes und der begrenzten Speicherkapazitäten mit geringeren Abrufen verbunden ist als die FS2. Die ausführliche Erläuterung der Begrenzungen und deren Auswirkungen sind den Detailanalysen der netzdienlichen Szenarien gemäß Kapitel 6.3.6.2 – 6.3.6.4 zu entnehmen, da diese vollständig auf die systemdienlichen Szenarien übertragbar sind. Nachfolgend liegt der Fokus auf der Analyse der FS2 zur Bereitstellung von Sekundärregelleistung (SRL), um die im Vergleich zum S3 (FG-BHKW: 12.632, PG-BHKW: 2.074) erhöhte Anzahl an Abrufen zu untersuchen.

ANALYSE DES ERHÖHTEN REALISIERBAREN FLEXIBILITÄTSPOTENTIALS DER ENERGIEAUFBRINGUNGSEINHEITEN

Die Aufbringungseinheiten werden aufeinanderfolgend flexibilisiert, wobei das Faulgas-BHKW vor dem Produktgas-BHKW abgefragt wird. Analog zu den netzdienlichen Szenarien können beide BHKWs bei positivem Flexibilitätsbedarf und einem Speicherfüllstand > 0 positive Flexibilität mittels Erhöhung der Leistung bis auf Nennleistung bereitstellen. Neben dem Faul- und Produktgas erfolgt auch hier keine Zufeuerung anderer Gase zur Leistungserhöhung. Neben positiver Flexibilität kann die Bereitstellung von negativer Flexibilität mittels Reduktion der Leistung bis hin zur vollständigen Abschaltung der BHKWs erfolgen. Das in diesem Zeitschritt nicht der thermischen Verwertung zugeführte Faul- oder Produktgas wird in den Gasspeicher eingeleitet.

Zur Analyse der Bereitstellung von Sekundärregelleistung durch den Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“, illustriert Abbildung 6-28 das Bedarfsprofil an systemdienlicher Flexibilität und die Auslastung je BHKW, sowie den zugehörigen Speicherfüllstand bei Durchführung der FS2. Um einen repräsentativen Vergleich zu ermöglichen, werden dieselben exemplarischen Sommerwochen wie im Rahmen der netzdienlichen Szenarien analysiert. Da das Bedarfsprofil zur Sekundärregelleistung im Jahr 2014 durchgehend hohe positive und negative Werte aufweist, beinhalten diese Wochen ebenfalls Tage, die die höchsten negativen Leistungen des Jahres beinhalten.



**Abbildung 6-28: Systemdienliches Szenario 8 nach OPTIEVLEX – a) Bedarfsprofil zur Sekundärregelleistung der Zelle 2, b) Betriebsführung des Faulgas-BHKWs und c) Faulgasspeicherfüllstand, d) Abrufsignal zur Sekundärregelleistung nach Abruf des Faulgas-BHKWs, e) Betriebsführung des Produktgas-BHKWs und f) Produktgasspeicherfüllstand bei Durchführung der FS2 für zwei exemplarische Sommerwochen für den Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ (Zelle 1)**

In Abbildung 6-28 ist ersichtlich, dass der stark fluktuierende Regelleistungsbedarf im MW-Bereich mit korrespondierenden Abrufen der Flexibilitäten beider BHKWs verbunden ist. Dabei erfolgt innerhalb der zwei Sommerwochen bei jedem negativen Abrufsignal eine vollständige Abschaltung der BHKWs. Generell zeigt sich dieses Bild auch bei Betrachtung des Jahresverlaufs was sich in den Füllständen der Faul- und Produktgasspeicher widerspiegelt. Die Füllstände steigen aufgrund der hohen Anzahl an negativen Abrufsignalen ( $5.262 \text{ ha}^{-1}$ ) und der damit verbundenen hohen negativen auszugleichenden Energiemenge (siehe Abbildung 5-35) kontinuierlich über das Jahr und nehmen einen maximalen Wert von  $100.000 \text{ Nm}^3$  an. Dies ist beispielsweise in Abbildung 6-28 am Tag 14 (Stunden 312 – 336) für den Produktgasspeicher ersichtlich. Da ein Speicher dieser Größe die 100-fache Stand-der-Technik-Kapazität

der GK5 (1.000 Nm<sup>3</sup> [11]) aufweist, ist anzunehmen, dass eine Realisierung dieser Kapazitäten kosten- und platzintensiv ist. Daher wurde eine zusätzliche Analyse mit einer Speicherbegrenzung von 10.000 Nm<sup>3</sup> durchgeführt. Dabei ergeben sich im Rahmen des S8 bei Durchführung der FS2 positive und negative realisierbare Energiemengen von 1.440 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> (-3 %) und -1.440 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> (-17 %) (SRL) bzw. 820 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> (-8 %) und -840 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> (-25 %) (TRL). Dies ist auf 30.079 (SRL) bzw. 17.381 (TRL) 15 min-Abrufe des Faulgas-BHKWs und 27.895 (SRL) bzw. 15.677 (TRL) Abrufe des Produktgas-BHKWs zurückzuführen.

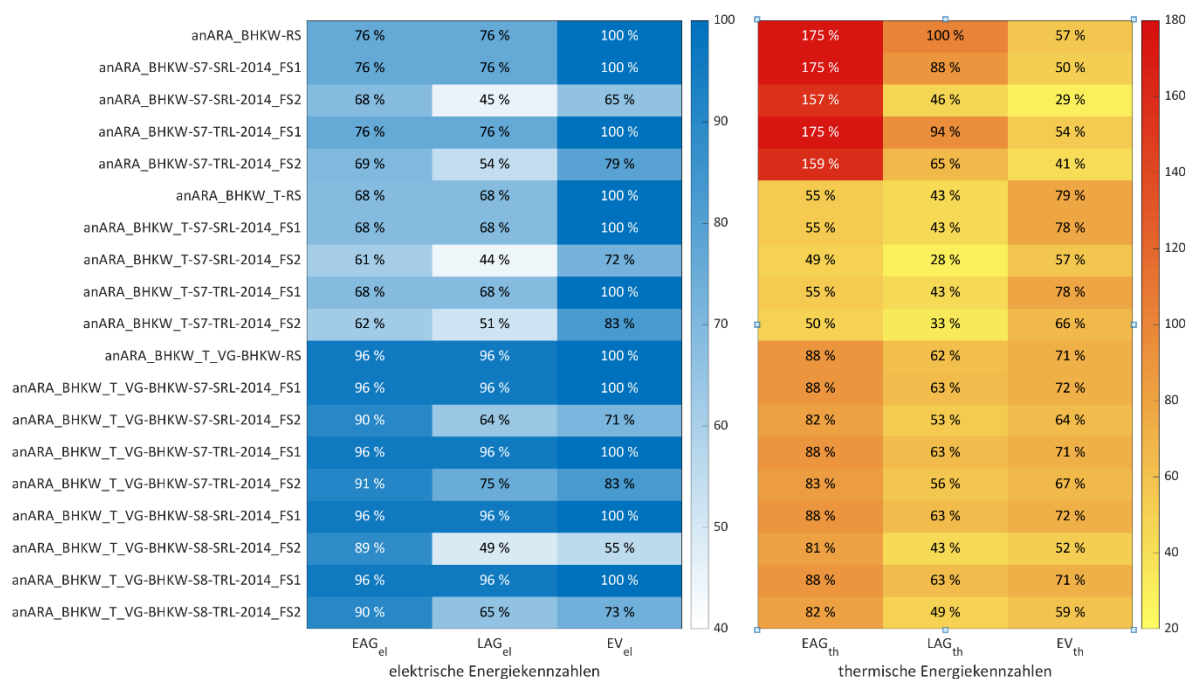
Beide BHKWs liefern zudem positive Regelleistung. Innerhalb der zwei exemplarischen Sommerwochen ist dies bei dem Faulgas-BHKW jedes Mal mit einem Hochfahren bis zur Nennleistung verbunden. Beim Produktgas-BHKW liegen lediglich am Tag 14 (Stunden 312 – 336) Zeitschritte vor, welche kein vollständiges Hochfahren des BHKWs zeigen. Hier gilt zu erwähnen, dass die Erkenntnisse hinsichtlich der Bereitstellung von positiver und negativer Flexibilität vollständig auf den Abruf von Tertiärregelleistung übertragbar sind.

Die Detailanalyse zum S8 bei Durchführung der FS2 und Bereitstellung von Sekundärregelleistung zeigt zusammenfassend, dass aufeinander folgende negative und positive Abrufsignale, die kontinuierlich über der flexiblen Leistung der Aufbringungseinheiten liegen, ohne Speicherbegrenzung mit einer hohen Ausnutzung des maximalen Potentials verbunden sind. Beispielsweise weist der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“, basierend auf den realisierbaren flexiblen Energiemengen, einen Ausnutzungsgrad der theoretischen positiven und negativen flexiblen Energiemenge der beiden Aufbringungseinheiten von 39,5 % (positive SRL) und 50,6 % (negative SRL) auf. Anhand der Zahlen ist erkennbar, dass die Aufbringungseinheiten im Rahmen der systemdienlichen Szenarien auch positive Flexibilität bereitstellen. Vor allem beim Produkt gas-BHKW treten im systemdienlichen S8 (40,0 % (positive SRL) und 46,0 % (negative SRL)), im Vergleich zu dem netzdienlichen S3 (1,3 % (positiv) und 1,4 % (negativ)), höherer Ausnutzungsgrade des theoretischen positiven und negativen Potentials auf. Der Überhang an negativem Flexibilitätsbedarf im Jahr 2014, und die damit verbundenen hohen Speicherfüllstände sind hier als Gründe zu nennen. Es gilt anzumerken, dass Speicherkapazitäten von 100.000 Nm<sup>3</sup> nicht dem Stand der Technik entsprechen und eine Realisierung von Speichern dieser Größe als kosten- und platzintensiv anzunehmen ist.

### 6.3.7.3 *Energiekennzahlen der Zelle 1 „Energieverbund“*

Die Detailanalyse in Kapitel 6.3.7.2 zeigt, dass im Rahmen der systemdienlichen Szenarien die Betriebsführung der flexiblen Energieaufbringungseinheiten durch die Bereitstellung von systemdienlicher Flexibilität beeinflusst wird. Dies führt dazu, dass die Flexibilisierung das elektrische und thermische Jahresaufbringungsprofil des jeweiligen Energieverbundes

(Zelle 1) verändert. Zur Quantifizierung der Veränderungen können die Energiekennzahlen Energie- (EAG) und Leistungsautarkiegrad (LAG), sowie Eigenverbrauchsanteil (EV) nach Kapitel 5.2 herangezogen werden. Abbildung 6-29 illustriert die elektrischen und thermischen Energiekennzahlen des Jahres 2014 für die ausgewählten Energieverbunde nach Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS). Zudem werden die Energiekennzahlen des Referenzszenarios (RS) zu Vergleichszwecken dargestellt. Die Energiekennzahlen des RS und die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden in Kapitel 6.3.5.2 erläutert.



**Abbildung 6-29: Systemdienliche Szenarien nach OPTIEVLEX – Energiekennzahlen der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario (RS)**

Die Energie- und Kostenkennzahlen der systemdienlichen Szenarien können, wie bereits im Rahmen der netzdienlichen Szenarien diskutiert, im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario Veränderungen aufweisen. Bei Betrachtung der elektrischen Energiekennzahlen ist ersichtlich, dass vor allem die FS2 mit einer Reduktion des EAG<sub>el</sub>, LAG<sub>el</sub> und EV<sub>el</sub> verbunden ist. Dies ist auf die Verschiebung der Energieaufbringung ohne Bedarfsprofil- und Speicherbegrenzung zurückzuführen. Hier gilt hervorzuheben, dass die Senkung des EAG<sub>el</sub> auf gefüllte Speicher am Ende des Jahres hinweist. Die bei negativen Abrufen eingespeicherte Gasmenge wird aufgrund des Überhangs an Zeitschritten mit negativem Flexibilitätsbedarf nicht vollständig für die Bereitstellung positiver Flexibilität aufgewandt, was beispielsweise beim Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ im S8 (SRL) mit einem Faulgas- bzw. Produktgasspeicherfüllstand von rund 95.700 Nm<sup>3</sup> bzw. 86.400 Nm<sup>3</sup> zum Jahresende verbunden ist. Hier könnte im Rahmen zukünftiger Analysen angedacht werden bei langen Perioden mit negativer Residuallast das Faulgas nicht ARA-

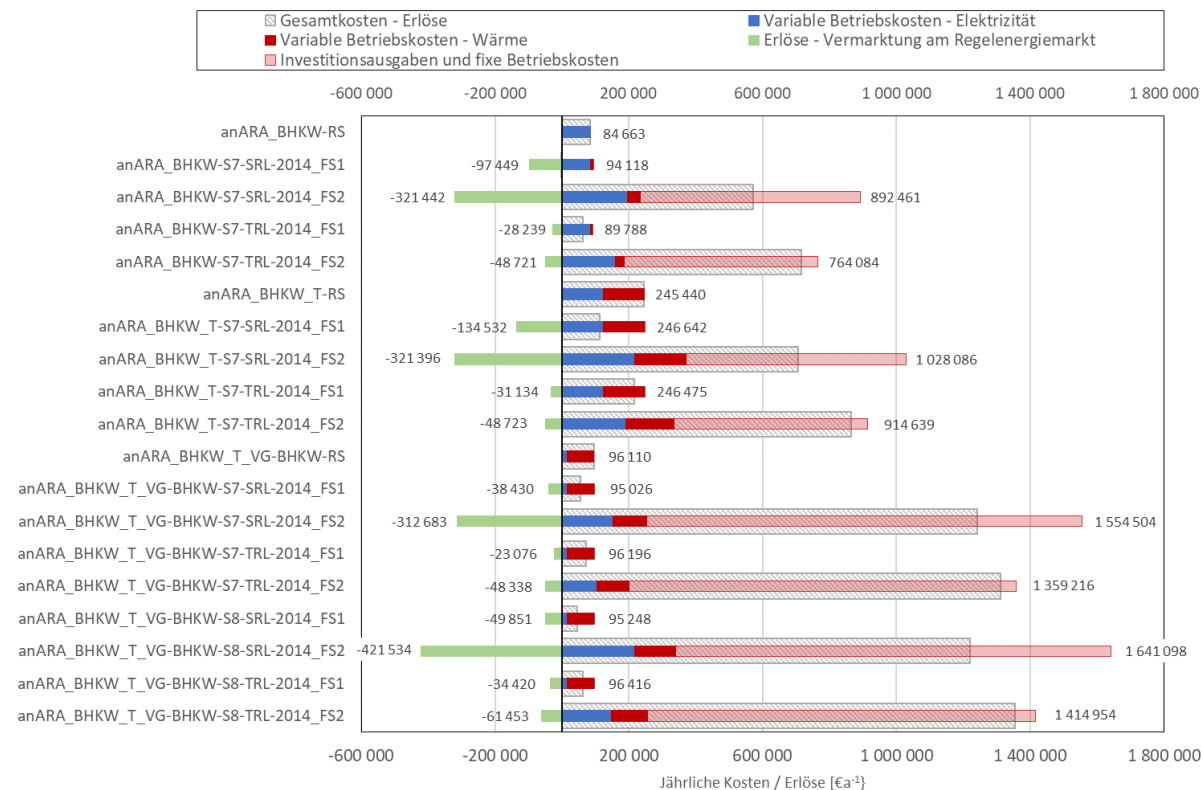


intern zwischenspeichern, sondern einer ARA-externen Nutzung zuzuführen. Dies könnte erforderliche Speicherkapazitäten reduzieren. Hier gilt es jedoch ein Optimum zwischen Einspeicherung und externer Nutzung zu finden, um weiterhin in Zeitschritten mit positivem Flexibilitätsbedarf ausreichend Gas zur Erhöhung der BHKW-Leistungen zur Verfügung zu haben. Die Erkenntnisse hinsichtlich der elektrischen Kennzahlen sind auf die thermischen Kennzahlen übertragbar. Bei Vergleich der netz- und systemdienlichen S1, S3, S7 und S8 wird deutlich, dass das S7 und das S8 bei Durchführung der FS2 niedrigere Kennzahlen aufweisen. Dies ist vor allem auf die höhere Anzahl an Abrufen negativer Flexibilität zurückzuführen. Die FS1 bedingt keine Änderungen der elektrischen Kennzahlen, führt jedoch zur Reduktion der thermischen Energiekennzahlen des Energieverbundes „anARA\_BHKW“. Hier ist davon auszugehen, dass die Flexibilisierung aufgrund des gleichbleibenden Wärmebedarfs des Energieverbundes ohne Spitzen durch das Trocknungsaggregat einen stärkeren Einfluss ausübt.

#### 6.3.7.4 *Kostenkennzahlen der Zelle 1 „Energieverbund“*

Wie in Kapitel 6.3.6.7 erläutert kann die Bereitstellung von Flexibilität mit einer Änderung der variablen Betriebskosten ( $Opex_{\text{variabel}}$ ) für extern zugekaufte elektrische und thermische Energie verbunden sein. Dies tritt vor allem dann auf, wenn die Flexibilisierung zu einer Änderung des  $LAG_{\text{el}}$  oder des  $LAG_{\text{th}}$  der Zelle 1 führt. Dabei steigen die Kosten bei sinkendem LAG und vice versa. Zudem können zusätzliche Investitionskosten ( $Capex$  und  $Opex_{\text{fix}}$ ) für die IKT und die Erweiterung der Gasspeicherkapazitäten anfallen.

Die Auswirkungen eines systemdienlichen Flexibilitätseinsatzes auf die Kostencharakteristika werden für die Zelle 1 „Energieverbund“ nachfolgend einer Detailanalyse unterzogen. Den Berechnungen liegt dabei ein Strompreis von  $11,93 \text{ €a}^{-1}$  zugrunde. Die im Rahmen der systemdienlichen Szenarien erzielten Erlöse basieren auf der je Zeitschritt vorgehaltenen und tatsächlich bereitgestellten Flexibilität, sowie den zugehörigen Leistungs- und Arbeitspreisen (siehe Kapitel 5.2.3). Abbildung 6-30 zeigt die für die Detailanalyse erforderlichen Kosten- (Investitionsausgabe, fixe und variable Betriebskosten) und Flexibilitätskennzahlen (Erlöse aus der Flexibilitätsbereitstellung) der Zelle 1. Hier gilt zu beachten, dass nur die durch die Flexibilisierung beeinflussten Kostenbestandteile illustriert werden. Die variablen Betriebskosten für die Entsorgung, sowie die Investitionsausgaben und fixen Betriebskosten für die Anlagenerweiterung gemäß Referenzszenario (RS) (siehe Abbildung 6-13) werden daher nicht in die Analysen einbezogen. Die Zahlen geben die Gesamtkosten bzw. Erlöse wieder und die grau schraffierten Balken stellen die Gesamtkosten abzüglich der Erlöse dar.



**Abbildung 6-30: Systemdienliche Szenarien nach OPTIEVLEX - Kostenkennzahlen der Zelle 1 „Energieverbund“ nach Szenario (S) und Flexibilisierungsstrategie (FS) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario (RS)**

In Abbildung 6-30 ist ersichtlich, dass die systemdienlichen Szenarien bei Durchführung der FS1, aufgrund der niedrigen realisierbaren flexiblen Energiemengen (siehe Abbildung 6-27), keine signifikanten Änderungen der variablen Betriebskosten verursachen. Lediglich bei dem Energieverbund „anARA\_BHKW“ kommt es zu einer Erhöhung der Wärmekosten. Im RS wird der Wärmedarf ARA-intern gedeckt, womit keine Wärmekosten vorliegen. In den systemdienlichen Szenarien hingegen treten Wärmekosten von rund 4.500 €/a<sup>-1</sup> (S7-TRL-2014\_FS1) bis ca. 8.800 €/a<sup>-1</sup> (S7-SRL-2014\_FS1) auf. Bei Durchführung der FS2 zeigen sich Gesamtkosten, welche weit über dem Niveau des jeweiligen RS liegen. Beispielsweise weist der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ im S8 bei Bereitstellung von Sekundärregelleistung Gesamtkosten von ca. 1,6 Mio. €/a<sup>-1</sup> (RS: rund 96.000€/a<sup>-1</sup>) auf. Die Zunahme der Gesamtkosten ist vor allem auf die Erhöhung der Investitionsausgaben und fixen Betriebskosten für die Erweiterung der Speicherkapazitäten auf 79.000 – 100.000 Nm<sup>3</sup> zurückzuführen. Deutlich wird dies vor allem bei dem Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“, da hier sowohl die Kapazität des Faulgas- (ca. +78.000 – +99.000 Nm<sup>3</sup>) als auch des Produktgasspeichers (ca. +97.000 Nm<sup>3</sup>) erweitert wird. Zudem sind die systemdienlichen Szenarien mit höheren Elektrizitätskosten verbunden. Auch hier ist dies vor allem am Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ erkennbar. So steigen beispielsweise die Elektrizitätskosten im Szenario S8-SRL-2014\_FS2 von rund 16.500 €/a<sup>-1</sup> auf 218.000 €/a<sup>-1</sup>. Die Wärmekosten nehmen in diesem Szenario eine Höhe von ca. 122.000 €/a<sup>-1</sup> (RS: 16.500 €/a<sup>-1</sup>) an.

Durch die Vermarktung der positiven flexiblen Energiemenge nach Abbildung 6-27 können jedoch auch Erlöse generiert werden, welche zur Senkung der Gesamtkosten beitragen können. Die um die Erlöse reduzierten Gesamtkosten sind als grau schraffierte Balken illustriert. Bei Durchführung der FS1 nähern sich die reduzierten Gesamtkosten in allen systemdienlichen Szenarien sogar an das Niveau der Gesamtkosten des RS an. Bei dem Energieverbund „anARA\_BHKW“ übersteigen die Erlöse im S7-SRL-2014\_FS1 sogar die Gesamtkosten. Die überschüssigen Erlöse könnten hier zur Amortisation von Anlagenerweiterungen beitragen. Die FS2 ist auch nach Abzug der Erlöse in allen Szenarien mit hohen Kosten verbunden, die weit über dem Niveau des jeweiligen RS liegen. Aus wirtschaftlicher Sicht ist daher eine Speichererweiterung in diesem Ausmaß nicht sinnvoll.

## 7 DISKUSSION DER ANALYSEN UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Application Software OPTIEVLEX ermöglicht eine Abschätzung des zeitlich aufgelösten elektrischen Flexibilitätpotentials von Energieverbunden kommunaler ARAs. Neben unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen finden dabei Flexibilitätsparameter wie maximale Abschaltdauern oder Regenerationszeiten Berücksichtigung. Um die Einsatzmöglichkeiten von OPTIEVLEX aufzuzeigen und um die in Kapitel 4 aufgestellten offenen Forschungsfragen zu beantworten wurden die in Kapitel 6 erläuterten Analysen durchgeführt. Zusammenfassend lassen sich aus den Analyseergebnissen die nachfolgenden Schlussfolgerungen ableiten.

**SCHLUSSFOLGERUNG 1: ENERGIEVERBUNDE VON BELEBUNGSANLAGEN MIT ANAEROBER SCHLAMMSTABILISIERUNG WEISEN HÖHERE STATIONÄRE  $EAG_{el}$  UND  $EAG_{th}$  AUF, ALS VERGLEICHBARE ENERGIEVERBUNDE VON BELEBUNGSANLAGEN MIT AEROBEM STABILISIERUNGSVERFAHREN.**

Die Schlussfolgerung 1 kann aus den Ergebnissen der Analyse 1, dargestellt in Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5, abgeleitet werden. Hier zeigen die Energieverbunde von Belebungsanlagen mit anaerober Schlammstabilisierung (anARAs) die jeweils höheren  $EAG_{el}$  und  $EAG_{th}$  als vergleichbare Energieverbunde von Belebungsanlagen mit aerober Stabilisierung (aARA). In der GK5 (100.001 EW) weist der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ beispielsweise einen  $EAG_{el}$  von 96 % und einen  $EAG_{th}$  von 88 % auf. Der vergleichbare Energieverbund „aARA\_T\_VG-BHKW“ zeigt hingegen einen  $EAG_{el}$  von 34 % und einen  $EAG_{th}$  von 46 %. Die höheren EAGs sind vor allem auf die Schlammfäulung und anschließende Faulgasnutzung in den anARAs zurückzuführen. Das Verfahren der Schlammfäulung ist derzeit hauptsächlich in Kläranlagen mit einer Ausbaupazität größer 20.000 EW integriert [19]. Aktuelle Untersuchungen zu Folge kann jedoch schon ab 10.000 EW ein wirtschaftlicher Betrieb erreicht werden [19, 23]. Bei der Planung von Anlagenerweiterungen bzw. neuen Anlagen nach dem Belebtschlammverfahren ist daher die Schlammfäulung inkl. nachfolgender Faulgasnutzung immer mitzudenken.

**SCHLUSSFOLGERUNG 2: DEZENTRALE (ARA-INTERNE) KONZEPTE ZUR KLÄRSCHLAMMTROCKNUNG BZW. - VERWERTUNG FÜHREN ZU EINER STEIGERUNG DES  $EAG_{el}$  UND/ODER DES  $EAG_{th}$ .**

Die Schlussfolgerung 2 kann ebenfalls aus den Ergebnissen der Analyse 1 abgeleitet werden (siehe Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5). Bei Betrachtung der Energiekennzahlen wird ersichtlich, dass der Energieverbund „anARA\_BHKW“ einen  $EAG_{el}$  von 76 % und einen  $EAG_{th}$  von 174 % aufweist. Dies bedeutet, dass diese Stand-der-Technik-Konfiguration bereits einen energetisch optimierten Energieverbund darstellt. Allerdings liegt eine Überversorgung an Wärme vor, welche für weitere Schlammbehandlungs- oder - nutzungsprozesse eingesetzt werden kann. Eine Möglichkeit stellt hier die Trocknung von Klärschlamm dar, welche der Reduktion des Wassergehaltes dient. Trocknungsanlagen sind Stand der Technik werden aber

meist aus platztechnischen oder finanziellen Gründen noch nicht standardmäßig auf kommunalen ARAs eingesetzt. Gemäß Literatur lässt sich eine dezentrale Trocknung heutzutage jedoch bereits ab einer Ausbaukapazität von 50.000 EW wirtschaftlich betreiben [21, 43, 51]. Die Integration von Trocknungsaggregaten wird beispielsweise durch den Energieverbund „anARA\_BHKW\_T“ mit einem  $EAG_{el}$  von 68 % und einem  $EAG_{th}$  von 54 % abgebildet. Hier lassen sich die reduzierten EAG im Vergleich zum Energieverbund „anARA\_BHKW“ durch den Energiebedarf des Trockners erklären. Der zusätzliche Energiebedarf könnte mittels Integration eines Aggregates zur thermischen Klärschlammverwertung ausgeglichen werden. Vor allem die Kombination von Faulgas- und Schlammverwertung kann bei Kraftwärmekopplung zu einer Steigerung der EAGs im Vergleich zum Energieverbund „anARA\_BHKW\_T“ führen. Beispielsweise zeigt die Konfiguration „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ einen  $EAG_{el}$  von 96 % und einen  $EAG_{th}$  von 88 %. Durch Restriktionen hinsichtlich der landwirtschaftlichen Klärschlammnutzung, sowie durch das Streben nach energieeffizienten Energieverbunden und Monoverwertungskonzepten zur Sicherung von Nährstoffen, gewinnen Energieverbunde mit Klärschlamm-trocknung und thermischer Klärschlammverwertung zusätzlich an Attraktivität (siehe Kapitel 2.3). Anlagen dieser Art könnten zukünftig den Stand der Technik widerspiegeln, und wären über den kurzfristige umsetzbare Zwischenschritt einer Trocknerintegration erreichbar.

Betrachtet man zudem die Kosten der drei vorab diskutierten Energieverbunde (siehe Abbildung 6-13) wird ersichtlich, dass der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ trotz erforderlicher Capex und  $Opex_{fix}$  von rund 655.500  $\text{€a}^{-1}$  aufgrund der Einsparungen an Strom- und Entsorgungskosten nur 280.000  $\text{€a}^{-1}$  Mehrkosten im Vergleich zum Energieverbund „anARA\_BHKW“ aufweist. Erhöhungen hinsichtlich der Abgabekosten für Klärschlamm oder der Energiepreise könnten zu höheren Gesamtkosten des Energieverbundes „anARA\_BHKW“ führen, was die Attraktivität von Energieverbunden mit Klärschlammverwertung weiter steigern könnte.

### **Schlussfolgerung 3: Die Identifikation von Energieverbunden kommunaler ARAs mit realisierbarem elektrischem Flexibilitätspotential ist anhand einer alleinigen Betrachtung des $EAG_{el}$ nicht möglich.**

In Kapitel 4 wurde im Rahmen der offenen Forschungsfragen die Hypothese aufgestellt, dass der  $EAG_{el}$  zur Identifikation einer zur Flexibilisierung geeigneten kommunalen ARA herangezogen werden kann. Diese Hypothese konnte mittels der Analysen in Kapitel 6 nicht bestätigt werden. Ein  $EAG_{el} > 0$  weist zwar auf ARA-interne Energieaufbringungseinheiten mit elektrischem Output hin, die gemäß Literatur [11, 12] Flexibilitätspotentiale bieten, ermöglicht jedoch keinen Rückschluss hinsichtlich deren Eignung zur Flexibilisierung. Zudem kann anhand des  $EAG_{el}$  nicht abgeleitet werden, ob die flexiblen Lasten des

Reinigungsprozesses Flexibilitätspotentiale aufweisen. Die Analysen mit OPTIEVLEX zeigen beispielsweise, dass die Energieverbunde „anARA\_BHKW“ und „anARA\_BHKW\_T“ über analoge flexible Leistungen verfügen, obwohl der Energieverbund „anARA\_BHKW“ mit einem höheren  $EAG_{el}$  verbunden ist. Im Referenzszenario zeigt dieser einen  $EAG_{el}$  von 96 %, während der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T“ einen Wert von 68 % aufweist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Trockner den elektrischen und thermischen Energiebedarf erhöht, aber gemäß Kapitel 5.6.5.2 nicht alle Kriterien erfüllt, um flexibilisiert zu werden.

Es gilt dennoch hervorzuheben, dass die Aufbringungseinheiten aufgrund ihrer positiven und negativen Flexibilitätspotentiale bei der Planung einer Flexibilisierung unbedingt zu berücksichtigen sind. Zudem bieten die Aufbringungseinheiten Flexibilitätspotentiale, die ohne Eingriffe in den direkten Abwasserreinigungsprozess gehoben werden können. Gemäß den Analysen mit OPTIEVLEX anhand dreier Energieverbunde der GK5 betragen beispielsweise die durchschnittlichen Flexibilitätspotentiale des Faulgas-BHKWs rund  $283 \text{ kW}_{el}$  und  $-257 \text{ kW}_{el}$ , was ca. 54 % des positiven und 100 % des negativen durchschnittlichen Gesamtpotentials der Energieverbunde „anARA\_BHKW“ und „anARA\_BHKW\_T“ entspricht. Hinsichtlich dem Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ beträgt der Anteil des Flexibilitätspotentials der Aufbringungseinheiten (Faulgas- und Produktgas-BHKW) am positivem bzw. negativem Gesamtpotential 64 % bzw. 100 %.

### **SCHLUSSFOLGERUNG 4: DAS ZEITLICH AUFGELÖSTE THEORETISCHE FLEXIBILITÄTSPOTENTIAL KANN ZUR IDENTIFIKATION GEEIGNETER ERNEUERBARER-ENERGIEGEMEINSCHAFTEN HERANGEZOGEN WERDEN.**

Wie in Kapitel 6.3.3.1 angewandt und erläutert kann das Flexibilitätsband, welches das Tagesprofil des theoretischen Flexibilitätspotentials abbildet, genutzt werden, um abzuschätzen, ob der Energieverbund der kommunalen ARA einen Beitrag zur Deckung der lokalen bzw. regionalen Residuallasten innerhalb einer Erneuerbaren-Energiegemeinschaft leisten kann.

### **SCHLUSSFOLGERUNG 5: ENERGIEVERBUNDE KOMMUNALER ARAS KÖNNEN NETZ- UND SYSTEMDIENLICHE FLEXIBILITÄT BEREITSTELLEN.**

Die im Rahmen des Standes der Forschung untersuchten Studien [11–14] zeigen, dass kommunale ARAs positive und negative Flexibilität bereitstellen können (siehe Kapitel 3.2.2), was die Analysen mit OPTIEVLEX gemäß Kapitel 6 bestätigen. Die Studien zeigen für eine kommunale ARA der GK5 (100.001 EW), welche den untersuchten Energieverbunden entspricht, realisierbare positive Energiemengen von  $10 - 1.357 \text{ MWh}_{el}a^{-1}$ , sowie negative Energiemengen von  $-16 - -2.365 \text{ MWh}_{el}a^{-1}$ . Im Rahmen der netzdienlichen Szenarien ergeben sich je nach Energieverbund und Flexibilisierungsstrategie, realisierbare positive Energiemengen von  $45 - 892 \text{ MWh}_{el}a^{-1}$ , sowie negative Energiemengen zwischen  $-42 \text{ MWh}_{el}a^{-1}$  und

-327 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup>. Die systemdienlichen Szenarien sind bei Bereitstellung von SRL je nach Energieverbund und Strategie mit realisierbaren positiven Energiemengen von 60 – 1.483 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup>, sowie negativen Energiemengen zwischen -46 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> und -1.737 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> verbunden. Liegt die TRL im Fokus werden positive Energiemengen von 24 – 892 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup>, sowie negative Energiemengen zwischen -20 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> und -1.203 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> bereitgestellt. Hier liegen ähnliche Werte wie im Rahmen der Literatur vor. Abweichungen können aufgrund von ARA-interne Faktoren, wie z.B. Ausstattung oder Betriebsweise, sowie auf externe Faktoren, wie z.B. Flexibilitätsbedarf oder Regenerereignisse, zurückzuführen sein. Details dazu werden im Rahmen der Schlussfolgerung 5 diskutiert.

Es gilt zu beachten, dass die Aufgabe einer kommunalen ARA in der Reinigung des Abwassers besteht, womit eine Flexibilisierung nur unter Erhalt einer ausreichenden Reinigungsleistung anzustreben ist.

### **SCHLUSSFOLGERUNG 6: ZUR ABSCHÄTZUNG DES REALISIERBAREN ELEKTRISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENTIALS VON ENERGIEVERBUNDEN KOMMUNALER ARAS SIND ANLAGENSPEZIFISCHE ANALYSEN ESSENZIELL.**

Die zeitlich aufgelösten elektrischen Jahreslast- und -aufbringungsprofile stellen die Basis zur Ermittlung von zeitliche aufgelösten elektrischen Flexibilitätspotentialen diverser Energieverbunde dar, und hängen von zahlreichen Faktoren ab. Besonders hervorzuheben sind der Zulaufmassenstrom, die zufließende Schmutzfracht, die Anlagenkonfiguration und die Betriebsweise der Aggregate. Zum Beispiel ist gemäß Abbildung 6-6 die Integration eines Trockners und/oder einer thermischen Klärschlammverwertung mit einer Verschiebung des Last- und Aufbringungsprofils verbunden, was in weiterer Folge die realisierbare flexible Energiemenge beeinflusst. Beispielsweise stellt der Energieverbund „anARA\_BHKW“ trotz analoger flexibler Aggregate im S1\_FS2 eine positive und negative realisierbare Energiemenge von 258 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> und -267 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> bereit, während der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T“ 254 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> und -263 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> zur Verfügung stellt.

Neben den Leistungsprofilen wird das Flexibilitätspotential von den Speicherkapazitäten, der Nennlast der Aufbringungseinheiten, den Flexibilitätsparametern Abschaltdauer und Regenerationszeit, sowie dem Flexibilitätsbedarf beeinflusst. Die Analysen mit OPTIEVLEX zeigen beispielsweise, dass die FS1 und FS2 bei analogen Flexibilitätsbedarfsprofilen, durch abweichende Flexibilitätsparameter und Grenzwerte z.B. hinsichtlich Speicherkapazitäten, mit unterschiedlichen realisierbaren Energiemengen verbunden sind (siehe Abbildung 6-14 und Abbildung 6-27). Der Energieverbund „anARA\_BHKW“ weist z.B. im S2 im Rahmen der FS1 positive und negative realisierbare Energiemengen von 356 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> und -190 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> auf, während bei Durchführung der FS2 Werte von 862 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> und -267 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup> vorliegen. Zudem zeigen die Analysen, dass der Flexibilitätsbedarf einen Einfluss auf das Potential

ausübt. Beispielsweise kann das Faulgas-BHKW nur positive Flexibilität bereitstellen, wenn vorab negative Flexibilität zur Befüllung des Faulgasspeichers führt (siehe Kapitel 6.3.6.2).

Die Ausführungen zeigen, dass die offenen Forschungsfragen welche Leistungsprofile und Flexibilitätspotentiale Energieverbunde unterschiedlicher Ausstattung aufweisen, und wie sich die Berücksichtigung von Flexibilitätsparametern auf die Potentiale auswirken, nur anlagenspezifisch beantwortet werden kann. Aufgrund der möglichen Nutzerspezifikationen stellt OPTIEVLEX eine Anwendung dar, die für anlagenspezifische Analysen zur Abschätzung der Profile und Potentiale herangezogen werden kann.

### **Schlussfolgerung 7: Das realisierbare elektrische Flexibilitätspotential kann je nach Rahmenbedingungen das theoretische Flexibilitätspotential weit unterschreiten.**

Die Erläuterungen zur Schlussfolgerung 6 deuten bereits an, dass die offene Forschungsfrage, welches Potential unter Berücksichtigung von Flexibilitätsparametern realisierbar ist, nur anlagenspezifisch beantwortbar ist. Allerdings kann anhand der Analyseergebnisse der netz- und systemdienlichen Szenarien (siehe Kapitel 6.3.6 und 6.3.7) gezeigt werden, dass aufgrund der in Schlussfolgerung 6 erläuterten Einflussfaktoren das theoretische Flexibilitätspotential je Zeitschritt nicht vollständig abgerufen werden kann. Zum Beispiel betragen die theoretischen positiven und negativen flexiblen Energiemengen bei Betrachtung des Energieverbundes „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ rund  $5.800 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-3.400 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$ . Im Rahmen der netz- und systemdienlichen Szenarien liegen realisierbare positive Energiemengen von  $45 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (S1) bis  $1.483 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (S8-SRL) vor, sowie realisierbare negative Energiemengen von  $-42 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (S1) bis  $-1.737 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (S8-SRL). Die theoretische positive Energiemenge kann daher zu 0,7 – 25,4 %, und die theoretische negative Energiemenge zu 1,2 – 50,6 % genutzt werden. Die Analyseergebnisse lassen darauf schließen, dass eine reine Darstellung theoretischer Potentiale ohne Berücksichtigung von z.B. Flexibilitätsbedarfsprofilen, Flexibilitätsparameter oder Speicherkapazitäten, einen falschen Eindruck hinsichtlich der Höhe des Flexibilitätspotentials eines spezifischen Energieverbundes vermitteln kann.

### **Schlussfolgerung 8: Die Integration thermischer Klärschlammverwertungskonzepte mit elektrischem Output kann zur Steigerung des elektrischen Flexibilitätspotentials führen.**

Zur Beantwortung der offenen Forschungsfrage, wie dezentrale Aggregate zur thermischen Klärschlammverwertung das Flexibilitätspotential einer kommunalen ARA beeinflussen, können die Analyseergebnisse zum Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ für die S1 – S3 (siehe Kapitel 6.3.6), sowie für das S8 (siehe Kapitel 6.3.7.2) herangezogen werden. Generell müssen die Verwertungskonzepte einen elektrischen Output aufweisen, um einen Einfluss auf die elektrischen Jahreslast- und -aufbringungsprofile, sowie die zeitlich aufgelösten Flexibilitätspotentiale auszuüben. Beispielsweise sind die BHKW- und



ORC-Konzepte mit einer elektrischer Energieaufbringung verbunden, die in Kombination mit Speicherkonzepten das Flexibilitätspotential erhöht. Dies zeigt sich z.B. bei Durchführung der FS2 in S3 und S8. Im S3 ist das Produktgas-BHKW für eine Steigerung der realisierbaren Energiemenge um  $17 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (positiv) und  $18 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (negativ) verantwortlich. Im S8 weist das Produktgas-BHKW die realisierbaren flexiblen Energiemengen von  $507 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-544 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (SRL) bzw.  $302 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-344 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  (TRL) auf. Die Durchführung der FS1 zeigt jedoch, dass die Flexibilisierung der Klärschlammverwertung auch mit einer Reduktion der realisierbaren Energiemengen verbunden sein kann. Dies ist beispielsweise bei einem Vergleich der Energieverbunde im Rahmen des S1 ersichtlich. Aufgrund der Begrenzung der Maximalleistung des BHKWs mit dem Bedarfsprofil des Energieverbundes, führt die zusätzliche elektrischer Energieaufbringung zu einer Begrenzung des Flexibilitätspotentials des Faulgas-BHKWs. Der Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ ist daher im S1 mit einer positiven und negativen realisierbaren Energiemenge des Faulgas-BHKWs von  $45 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-42 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  verbunden, während dieses im Energieverbund „anARA\_BHKW“ Energiemengen von  $192 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  und  $-190 \text{ MWh}_{\text{el}}\text{a}^{-1}$  bereitstellt.

Zusammenfassend kann jedoch gesagt werden, dass ein vorhandenes Flexibilitätspotential durch Aggregate zur Klärschlammverwertung genutzt werden soll, da auch dieses Potential ohne direkte Eingriffe in den Reinigungsprozess gehoben werden können.

### **SCHLUSSFOLGERUNG 9: DIE BEREITSTELLUNG VON FLEXIBILITÄT FÜHRT ZUR ÄNDERUNGEN DER ENERGIE- UND KOSTENKENNZAHLEN EINES ENERGIEVERBUNDES.**

Auf Basis der Analyseergebnisse (siehe Kapitel 6.3.6.5 bis 6.3.6.7, sowie 6.3.7.3 und 6.3.7.4), kann die offene Forschungsfrage wie sich ein netz- und systemdienlicher Flexibilitätseinsatz auf die Energie- und Kostencharakteristika auswirkt beantwortet werden. Zusammenfassend betrachtet zeigen die Energiekennzahlen der netz- und systemdienlichen Szenarien, dass vor allem die offensive Flexibilisierungsstrategie (FS2) mit einer Reduktion des elektrischen und thermischen LAG, sowie EV verbunden ist. Dies führt wiederum zu höheren Kosten für extern zugekaufte elektrische und thermische Energie. Hier zeigt sich, dass bereits geringe Änderungen der Kennzahlen mit erheblichen Kostenänderung verbunden sind. Beispielsweise ist beim Energieverbund „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“ im S1\_FS2 ein um 8 % (absolut) reduzierter  $\text{LAG}_{\text{el}}$  mit rund  $50.000 \text{ €a}^{-1}$  (+300 %) Mehrkosten für Elektrizität verbunden.

Zudem wird anhand der Kostenkennzahlen ersichtlich, dass die Flexibilisierung mit Investitionsausgaben und fixen Betriebskosten für die zu integrierende IKT (ca.  $430 \text{ €a}^{-1}$ ), sowie für die erforderliche Erweiterung der Speicherkapazitäten bei Durchführung der FS2 (bis zu  $18.200 \text{ €a}^{-1}$  im S4\_FS2) verbunden ist. Die Kosten für Speichererweiterungen fallen vor allem bei den systemdienlichen Szenarien bei Durchführung der FS2 ins Gewicht, da hier ohne

Speicherbegrenzung erforderliche Faulgas- und Produktgasspeichervolumina von bis zu 100.000 Nm<sup>3</sup> auftreten und zu Kosten von bis zu 1,3 Mio. €a<sup>-1</sup> führen.

**SCHLUSSFOLGERUNG 10: DIE DURCH DIE BEREITSTELLUNG VON NETZ- UND SYSTEMDIENLICHER FLEXIBILITÄT ERZIELBAREN ERLÖSE KÖNNEN ZUR WIRTSCHAFTLICHKEIT VON FLEXIBILITÄTSMABNAHMEN FÜHREN.**

Die netzdienlichen Szenarien (siehe Kapitel 6.3.6.7) zeigen, dass trotz zusätzlicher Kosten bei einer Flexibilisierung, die Teilnahme an einer EEG wirtschaftliche Anreize für den Energieverbund bieten kann. Durch die Vermarktung der positiven realisierbaren flexiblen Energiemengen nach Abbildung 6-14 zum EEG-Strompreis (siehe Tabelle 6-11), können Erlöse generiert werden. In Szenarien mit hoher positiver Energiemenge, z.B. bei dem Energieverbund „anARA\_BHKW“ das S2\_FS2 (ca. 860 MWh<sub>el</sub>a<sup>-1</sup>), können die Erlöse die Kosten der Flexibilisierung sogar übersteigen. Die überschüssigen Erlöse könnten hier zur Amortisation von Anlagenerweiterungen, z.B. mit einer thermischen Klärschlammverwertung, beitragen. Hinsichtlich des Quartiers, führen die netzdienlichen Szenarien zu sinkenden Elektrizitätskosten, da ein Teil der extern zugekauften Energiemenge nicht vom Netz sondern vom Energieverbund zum niedrigeren EEG-Strompreis bezogen werden kann. Zudem sind durch die Bereitstellung der PV-Überschüsse an den Energieverbund Erlöse erzielbar, welche zur Deckung der Elektrizitätskosten beitragen. Zusammenfassend zeigen alle Szenarien geringere Kosten als das RS, womit eine EEG auch für das Quartier finanzielle Anreize bietet. Für alle Energieverbunde („anARA\_BHKW“, „anARA\_BHKW\_T“ und „anARA\_BHKW\_T\_VG-BHKW“) als auch für das Quartier stellt das Szenario S2\_FS2 das wirtschaftlichste Szenario dar. Bei Durchführung der FS1 nähern sich die reduzierten Gesamtkosten in allen systemdienlichen Szenarien (siehe Kapitel 6.3.7.4) sogar an das Niveau der Gesamtkosten des Referenzszenarios an. Die Bereitstellung von Sekundärregelleistung im Rahmen der FS1 stellt 2014 in allen Szenarien die wirtschaftlichste Variante dar. Die FS2 ist auch nach Abzug der Erlöse in allen Szenarien mit hohen Kosten verbunden, die weit über dem Niveau des jeweiligen Referenzszenarios liegen. Aus wirtschaftlicher Sicht ist daher eine Flexibilisierung, die mit einer derartigen Speichererweiterung verbunden ist, nicht sinnvoll.

## 8 AUSBLICK

Im Rahmen des Ausblickes erfolgt eine kritische Betrachtung des Modells, um mögliche zukünftige Forschungstätigkeiten zur Anpassung oder Erweiterung des Modells ableiten zu können. Zudem wird aufgezeigt welche Einsatzmöglichkeiten OPTIEVLEX in Zukunft bietet.

### KRITISCHE BETRACHTUNG

Die der Application Software OPTIEVLEX hinterlegten Energiebilanz- und Steady-State-Teilmodelle (siehe 5.1.2) bauen auf dem derzeitigen Stand der Forschung auf und fokussieren die energietechnische Betrachtung. Dieser Fokus ermöglicht eine Abschätzung von elektrischen realisierbaren Flexibilitätspotentialen ohne im ersten Schritt eine zeit-, daten- und kostenintensive kalibrierte Simulation der Reinigungsprozesse zu benötigen, ist jedoch mit einer begrenzten Berücksichtigung diverser Faktoren und Prozesse verbunden. Folgende Punkte gilt es dabei besonders hervorzuheben:

1. Die biologischen Abbauprozesse im Belebungsbecken und die damit verbundenen Prozessparameter, Ablaufwerte und Schlammparameter werden über Auslegungsberechnungen gemäß dem Arbeitsblatt DWA-A 131 [74] berücksichtigt. Eine zeitlich aufgelöste Simulation wird nicht vorgenommen. Hinsichtlich der Einhaltung von Grenzwerten bei Prozessparameter und Ablaufwerten Im Zuge einer Flexibilisierung wird angenommen, dass die Flexibilisierungsparameter gemäß Schäfer et al. [11] eine ausreichende Reinigungsleistung sicherstellen. Die Schlammparameter werden je Saison ermittelt und innerhalb dieser als konstant betrachtet.
2. Der CSB-Abbaugrad im Faulturm wird auf Basis der spezifizierten Prozessparameter je Saison ermittelt und innerhalb dieser als konstant betrachtet. Eine zeitlich aufgelöste Simulation unter Berücksichtigung von schwankenden Schlamm- und Prozessparametern, welche im Rahmen der Flexibilisierung durch die Abschaltung der Wärmeversorgung oder der flexiblen Aggregate des Reinigungsprozesses auftreten können, wird nicht vorgenommen. Die schwankende Speicherkapazität des Faulturms für Faulgas wird daher ebenfalls nicht berücksichtigt. Das Faulgas wird zur Gänze einem Faulgasspeicher zugeführt.
3. Die Produktgasproduktion wird auf Basis einer stationären Simulation des Vergaserprozesses ermittelt. Hier erfolgt keine zeitlich aufgelöste Simulation unter Berücksichtigung von schwankenden Schlamm- und Prozessparametern.
4. Spezifische Schlammbehandlung- und Klärschlammnutzungsverfahren, wie die Ultraschalldesintegration, die thermische Hydrolyse oder die Pyrolyse finden derzeit keine Berücksichtigung in OPTIEVLEX.

5. Im Rahmen von OPTIEVLEX wird angenommen, dass ausreichend Pufferkapazitäten zur Abschaltung der Pumpen im Rahmen einer Flexibilisierung zur Verfügung stehen.
6. Hinsichtlich der Flexibilisierung wird zur Ermittlung des theoretischen Flexibilitätspotentials angenommen, dass keine Begrenzung der Schaltvorgänge bei Aggregaten zur Faulgas- und Klärschlammnutzung vorliegt. Zudem wird eine Zufeuerung von externen Gasen zur Erhöhung des Flexibilitätspotentials nicht berücksichtigt.
7. Die Flexibilisierung diverser Schlammbehandlungsaggregate wie z.B. der Trocknung wird in der aktuellen Version von OPTIEVLEX nicht untersucht.
8. Die Flexibilisierung auf Basis von Preissignalen (marktdienlicher Einsatz) wird nicht analysiert.
9. Netzseitig werden keine Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkungen einer ARA-Flexibilisierung auf die Betriebsmittel (z.B. Leitungsüberlastungen) und etwaige Spannungsbandverletzungen vorgenommen.

Bei Betrachtung der Punkte 1 und 2 wird ersichtlich, dass OPTIEVLEX spezialisierte Software-Tools, beispielsweise zur Modellierung der biologischen Abbauprozesse, nicht ersetzt, sondern eine Ergänzung dieser darstellt. Hier könnte im Rahmen zukünftiger Forschungstätigkeiten in Zusammenarbeit mit Experten der jeweiligen Fachgebiete eine Erweiterung von OPTIEVLEX erfolgen. Beispielsweise könnten Schnittstellen zu bestehenden Softwaretools zur Simulation der Prozessparameter aerober und anaerober Schlammstabilisierung geschaffen werden. Dies würde eine zeitlich aufgelöste Simulation von Ablaufwerten und Schlammparameter ermöglichen. Die zeitlich aufgelösten Schlammparameter könnten in weiterer Folge den Input für eine zeitlich aufgelöste Simulation des Vergasungsprozesses (Punkt 3) darstellen. Eine Schnittstelle zu einem geeigneten Softwaretool oder eine Erweiterung des Matlab-Modells könnte hier im Rahmen zukünftiger Forschungstätigkeiten erarbeitet werden. Zudem könnte eine Erweiterung von OPTIEVLEX mit Modulen, die die Prozesse, Pufferkapazitäten und Flexibilisierungsstrategien gemäß Punkt 4 bis 8 abbilden erfolgen. Hinsichtlich Punkt 9 könnten die mit OPTIEVLEX ermittelten zeitlich aufgelösten elektrischen Jahreslast- und -aufbringungsprofile, sowie die damit verbundenen zeitlich aufgelösten Flexibilitätspotentiale als Input für Netzanalysen herangezogen werden. Die Analyse der Auswirkungen auf etwaige Auslastungsgrade netzseitiger Betriebsmittel oder Spannungsbandverletzungen könnte damit vorgenommen werden.

Abschließend gilt zu beachten, dass gemäß Kapitel 5.8, die zeitlich aufgelösten elektrischen Jahreslast- und -aufbringungsprofile, die Flexibilitätspotentiale, sowie die Einsatzmodellierung nicht mit Realdaten validiert werden konnten. Um eine ausreichende Datengrundlage zu gewährleisten, könnten Realversuche zur Flexibilisierung angedacht werden.

### ZUKÜNFTIGE EINSATZMÖGLICHKEITEN VON OPTIEVLEX

OPTIEVLEX dient dem Aufbau von Wissen, um damit Hemmnisse im Zusammenhang mit der Flexibilisierung für Anlagen- und Netzbetreiber, sowie Energieversorger zu reduzieren. Eine schnelle Abschätzung von stationären energietechnischen Charakteristika oder des zeitlich aufgelösten Flexibilitätspotentials bzw. der Auswirkungen einer Flexibilisierung auf die Energie- und Kostencharakteristika sollen eine tiefere Auseinandersetzung mit der Thematik ermöglichen. Wird OPTIEVLEX im Rahmen von Forschungsprojekten eingesetzt können Analyseergebnisse nicht nur für die jeweilige Anlage Vorteile bieten, sondern auch für Netz- und Systemanalysen eingesetzt werden. Dies könnte beispielsweise die Ermittlung österreichweiter Potentiale ermöglichen. Zudem könnte weiter untersucht werden wie Energieverbände kommunaler ARAs in Energiegemeinschaften integriert werden können bzw. wie die Flexibilitäten kommunaler ARAs bei der Integration erneuerbarer Energiequellen in das elektrische Netz unterstützen können. Zudem gilt es verschiedene aerobe und anaerobe Anlagenkonfigurationen zu untersuchen, um mögliche Verbesserungspotentiale für OPTIEVLEX aufzuzeigen. Die Berücksichtigung von Aggregaten zur dezentralen Klärschlammnutzung (siehe Kapitel 2.3) stellt einen neuen Forschungsbereich dar und bietet die Möglichkeit deren Einfluss auf die elektrischen und thermischen Last- und Aufbringungsprofile, sowie die elektrischen Flexibilitätspotentiale zu untersuchen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können Anlagenbetreiber bei Investitionsentscheidungen unterstützen und Netzbetreiber, sowie Energieversorger auf mögliche Veränderungen der Leistungsprofile vorbereiten.

## 9 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Klima- und energiepolitischer Rahmen bis 2030*. URL [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_de](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_de). – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-10-21
- [2] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Ein europäischer Grüner Deal : Erster klimaneutraler Kontinent werden*. URL [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_de#documents](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de#documents). – Aktualisierungsdatum: 2021 – Überprüfungsdatum 2021-05-30
- [3] BUNDESMINISTERIUM FÜR NACHHALTIGKEIT UND TOURISMUS: *#mission2030 : Die österreichische Klima- und Energiestrategie*. Wien, 2018
- [4] BUNDESKANZLERAMT ÖSTERREICH: *Aus Verantwortung für Österreich : Regierungsprogramm 2020-2024*. Wien, 2020
- [5] BUNDESMINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE: *Bundesgesetz über den Ausbau von Energie aus erneuerbaren Quellen* (idF v. BGBl. I Nr. 150/2021). URL [https://www.ris.bka.gv.at/Dokument.wxe?Abfrage=BgblAuth&Dokumentnummer=BGBLA\\_2021\\_I\\_150](https://www.ris.bka.gv.at/Dokument.wxe?Abfrage=BgblAuth&Dokumentnummer=BGBLA_2021_I_150) – Überprüfungsdatum 2021-08-02
- [6] E-CONTROL: *Dezentrale Erzeugung in Österreich*. Wien, 02/2005
- [7] HÄNSCH, Jonathan ; SCHMIDT, Uwe: *Betrieb des Energieversorgungsnetzes mit dezentralen regenerativen Einspeisern* (5. Energieforum). Bautzen, 15.03.2018. URL [http://www.tgz-bautzen.de/fileadmin/media/pdf/Energieagentur/Veranstaltungen/5.\\_Energieforum/2\\_H%C3%A4nsch\\_HSZG.pdf](http://www.tgz-bautzen.de/fileadmin/media/pdf/Energieagentur/Veranstaltungen/5._Energieforum/2_H%C3%A4nsch_HSZG.pdf) – Überprüfungsdatum 2021-01-02
- [8] METZ, Michael: *Flexible Energieversorgung : Modellierung der Last- und Erzeugungssituation dezentraler Versorgungsgebiete zur Bestimmung der Systemflexibilität*. Dortmund, Technische Universität Dortmund, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Dissertation. 2013. URL <https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/33484/1/Dissertation.pdf> – Überprüfungsdatum 2021-01-04
- [9] *DIN EN 50160:2020-11, Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen*
- [10] HÜBNER, Michael ; WEDLER, Michael ; GANGLBERGER, Erika; HINTERBERGER, Robert (Mitarb.); KOLLMANN, Andrea (Mitarb.); PRÜGGLER, Wolfgang (Mitarb.); (Keine Angabe) (Mitarb.) : *Betrachtung von Flexibilitätspotenzialen für die Umsetzung von Smart Grids in Österreich*. White Paper im Rahmen des Strategieprozess [Smart Grids 2.0]. Wien, 2017

- [11] SCHÄFER, Michael ; HÜESKER, Frank ; SALOMON, Dirk ; GRETZSCHEL, Oliver ; KNERR, Henning ; SCHMITT, Theo G.: *Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung*. - arrivee : BMBF-ERWAS Verbundvorhaben. 2017
- [12] MÜLLER, Ernst A. ; GRAF, Eliane ; KOBEL, Beat ; HURNI, Andreas ; WENGER, René ; FREI, Urban ; CHRISTEN, Curdin ; MOSER, Ruedi ; FRITZSCHE, Cristina ; MATHYS, Olivier ; KERNEN, Martin ; FARHNI, Joelle; BOLLER, Roland (Mitarb.); KOCH, Gerhard (Mitarb.); BANGERTER, Bruno (Mitarb.); ISCHER, Thoma (Mitarb.); ISCHER, Max (Mitarb.); RÜEGG, Kurt (Mitarb.); GANASSI, Claudio (Mitarb.); SÄGESSER, Markus (Mitarb.); BUCHS, Urs (Mitarb.); STRAUBHAAR, Heiner (Mitarb.); ZIMMERMANN, Urs (Mitarb.); ZEMP, Christoph (Mitarb.) : *Potential der Schweizer Infrastrukturanlagen zur Lastverschiebung*. Bern, 2013
- [13] REINHOFER-GUBISCH, M. ; PUCKER, J. ; FRANTES, B. ; REZANIA, R.: *LoadShift: Lastverschiebung in Haushalt, Industrie, Gewerbe und kommunaler Infrastruktur - Potenzialanalyse für Smart Grids : Lastverschiebung bei kommunalen Kläranlagen und Wasserversorgungssystemen*. Österreichische Begleitforschung zu Smart-Grids. Wien, 2014
- [14] SCHLOFFER, Martin ; LANG, Evelyn ; NOWAK, Otto ; ENDERLE, Peter ; PREGARTBAUER, Reinhard: *Loadshift-ARA : Lastverschiebung in der Abwasserreinigung - Kommunale Kläranlagen als Bestandteil smarter Energiesysteme*. Wien, 2015 (e!Mission.at - 4. Ausschreibung Publizierbarer Endbericht)
- [15] GRETZSCHEL, Oliver ; SCHÄFER, Michael ; HONECK, Verena ; DORNBURG, Arthur: *Wasserwirtschaftliche Anlagen als Flexibilitätsdienstleister im Stromnetz*. Zwischenergebnisse aus Projekten der BMBF-Fördermaßnahmen ERWAS. In: *KA Korrespondenz Abwasser Abfall* 63 (2016), Nr. 8, S. 670–678. URL [file:///C:/Users/Kerstin/AppData/Local/Temp/43\\_Flexibilitaet\\_Stromnetz201608.pdf](file:///C:/Users/Kerstin/AppData/Local/Temp/43_Flexibilitaet_Stromnetz201608.pdf) – Überprüfungsdatum 2021-01-13
- [16] RAT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT: *Richtlinie über die Behandlung von kommunalem Abwasser* (idF v. 91/271/EWG) (1991-05-21). URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31991L0271&from=DE> – Überprüfungsdatum 2020-07-24
- [17] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL: *Energiecheck und Energieanalyse : Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen*. Dezember 2015. Hennef : DWA, 2015 (DWA-Arbeitsblatt A 216)

- [18] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL: *Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen : Stromverbrauch und Stromerzeugung*. 28. Auflage. Hennef, 2015
- [19] ASSMANN, Manfred ; DÜRR, Kathrin ; HABERFELLNER-VEIT, Elisabeth ; LABER, Johannes ; LINDTNER, Stefan ; TSCHIESCHE, Ulrich: *Branchenbild der österreichischen Abwasserwirtschaft 2020*. Wien, 2019
- [20] HERKNER, Thomas ; REHBERG, Jörg ; KOLVENBACH, Franz-Josef: *Abwasserdaten Deutschland : Strukturdaten der Abwasserentsorgung*. 4. Aufl. Bonn, 2019
- [21] GUJER, Willi: *Siedlungswasserwirtschaft : Mit 84 Tabellen*. 3., bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007
- [22] BISCHOFBERGER, Wolfgang: *Anaerobtechnik*. 2., vollst. überarb. Aufl. Berlin : Springer, 2005
- [23] GRETZSCHEL, Oliver ; SCHMITT, Theo G. ; HANSEN, Joachim ; SIEKMANN, K. ; JAKOB, J.: *Schlammfäulung statt aerober Stabilisierung? : Studie zur Wirtschaftlichkeit: Macht sich die Umstellung von aeroben Stabilisierungsanlagen auf Faulungsbetrieb bezahlt?* In: *KA Korrespondenz Abwasser Abfall* 59 (2012), Nr. 12, S. 1144–1152. URL [https://www.siekmann-ingenieure.de/media/wwt-3-2012-fachartikel\\_gretzschel.indd\\_.pdf](https://www.siekmann-ingenieure.de/media/wwt-3-2012-fachartikel_gretzschel.indd_.pdf) – Überprüfungsdatum 2020-07-21
- [24] METCALF & EDDY, INC; AECOM; TCHOBANOGLOUS, George (Mitarb.); STENSEL, David H. (Mitarb.); TSUCHIHASHI, Ryujiro (Mitarb.); BURTON, Franklin (Mitarb.); ABU-ORF, Mohammad (Mitarb.); BOWDEN, Gregory (Mitarb.); PFRANG, William (Mitarb.) : *Wastewater engineering : Treatment and resource recovery*. Fifth edition. New York : McGraw-Hill Education, 2014
- [25] VISMANN, Ulrich (Hrsg.); BIENER, Ernst (Mitarb.); BORRMANN, André (Mitarb.) : *Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln*. 36. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2018
- [26] BISCHOF, Wolfgang ; HOSANG, Wilhelm: *Abwassertechnik*. 11. Aufl. Stuttgart, Leipzig : B.G. Teubner, 1998
- [27] IMHOFF, Karl ; IMHOFF, Klaus R.: *Taschenbuch der Stadtentwässerung*. 32., verbesserte Auflage. JARDIN, Norbert (Hrsg.); BAUMANN, Peter (Mitarb.); BECKER, Michael (Mitarb.); BOSSELER, Bert (Mitarb.); CORNEL, Peter (Mitarb.); FRECHEN, Franz-Bernd (Mitarb.); GRÜNEBAUM, Thomas (Mitarb.); KLOPP, Ralf (Mitarb.); KOPP, Julia (Mitarb.); LONDONG, Jörg (Mitarb.); PODRAZA, Petra (Mitarb.); ROSENWINKEL, Karl-Heinz (Mitarb.); SADOWSKI, Arnd (Mitarb.); MÜLLER-SCHAPER, Johannes (Mitarb.); SCHAUM, Christian (Mitarb.); SCHMITT,



- Theo (Mitarb.); THÖLE, Dieter (Mitarb.); WEYAND, Michael (Mitarb.); WILL, Joanna (Mitarb.) . Essen : DIV Deutscher Industrieverlag GmbH, 2018
- [28] DRAXLER, Josef: *Abwasserreinigung*. Leoben, 2007
- [29] BUNDESMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, REGIONEN UND TOURISMUS: *Thermische Abfallbehandlung in Österreich : Weißbuch - Zahlen, Daten, Fakten*. 2. Auflage. Wien, 2009
- [30] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL: *Eindickung von Klärschlamm*. Oktober 2007. Hennef : DWA, 2007 (DWA-Merkblatt M 381)
- [31] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL: *Maschinelle Schlammwässerung*. Februar 2013. Hennef (Sieg) : DWA, 2013 (DWA-Merkblatt M 366)
- [32] SEKIN, Özkan: *Vierte Reinigungsstufe in kommunalen Abwasserreinigungsanlagen : Möglichkeiten, Bemessung, Kosten und Betriebserfahrungen für die weitergehende Behandlung von Abwasser*. Graz, Technische Universität Graz, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau. Masterarbeit. 2016. URL [https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/Institute/SWW/3\\_Unterseite\\_Lehre/4\\_Masterarbeiten/MA\\_SEKIN.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/SWW/3_Unterseite_Lehre/4_Masterarbeiten/MA_SEKIN.pdf) – Überprüfungsdatum 2020-09-02
- [33] ÜBERREITER, E. ; LENZ, K. ; ZIERITZ, I.: *Kommunales Abwasser : Österreichischer Bericht 2016*. Wien, 2018
- [34] ROSKOSCH, Andrea ; HEIDECHE, Patric; BANNICK, Claus-Gerhard (Mitarb.); BRANDT, Simone (Mitarb.); BERNICKE, Maja (Mitarb.); DIENEMANN, Claudia (Mitarb.); GAST, Marcus (Mitarb.); HOFMEIER, Maximilian (Mitarb.); KABBE, Christian (Mitarb.); SCHWIRN, Kathrin (Mitarb.); VOGEL, Ines (Mitarb.); VÖLKER, Doris (Mitarb.); WIECHMANN, Benjamin (Mitarb.) : *Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland*. Dessau-Roßlau, 2018
- [35] BUNDESMINISTERS FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT: *Deponieverordnung* (idF v. 455/2011) (2016). URL <https://www.bmlrt.gv.at/umwelt/abfall-ressourcen/abfall-altlastenrecht/awg-verordnungen/deponievo.html>
- [36] VANAS, Fabian: *Aktuelle Situation und zukünftige Entwicklungen bei der Klärschlamm Entsorgung in Österreich*. Wien, Universität für Bodenkultur, Institut für Siedlungswasserbau, Industrierwasserwirtschaft und Gewässerschutz. Masterarbeit. 2016. URL [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiz5\\_GlktjwAhWM5KQKH8zDWUQFjAKegQIAhAD&url=https%3A%2F%2Fabstracts.boku](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiz5_GlktjwAhWM5KQKH8zDWUQFjAKegQIAhAD&url=https%3A%2F%2Fabstracts.boku)

.ac.at%2Fdownload.php%3Fdataset\_id%3D13542%26property\_id%3D107&usg=AOvWaw16rYw63BF3Rq1yDOsxhMEm – Überprüfungsdatum 2021-05-20

- [37] RAT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT: *Richtlinie über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft* (idF v. 86/278/EWG) (1986-06-12). URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31986L0278&from=EN> – Überprüfungsdatum 2020-07-24
- [38] OLIVA, Judith ; BERNHARDT, Antonia ; REISINGER, Hubert ; DOMENIG, Manfred ; KRAMMER, Hans-Jörg: *Klärschlamm : Materialien zur Abfallwirtschaft*. REP-0221. Wien, 2009 (ISBN 978-3-99004-019-5)
- [39] ÖSTERREICHISCHER WASSER- UND ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: *ÖWAV-Positionspapier - Klärschlamm als Ressource*. Wien, 2014
- [40] KRATZEISEN, Martin ; STARCEVIC, Nikica ; MARTINOV, Milan ; MAURER, Claudia ; MÜLLER, Joachim: *Applicability of biogas digestate as solid fuel*. In: *Fuel* 89 (2010), Nr. 9, S. 2544–2548
- [41] BUNDESMINISTERIUM FÜR NACHHALTIGKEIT UND TOURISMUS: *Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017 : Teil 1*. Wien, 2017 (ISBN 978-3-903129-33-7)
- [42] KRETSCHMER, Florian ; ZINGERLE, Thomas ; ERTL, Thomas: *Perspektiven der künftigen Klärschlammbewirtschaftung in Österreich*. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 70 (2018), 11-12, S. 579–587
- [43] KÜGLER, Ingo ; ÖHLINGER, Andreas ; WALTER, Birgit; KARIGL, Brigitte (Mitarb.); NEUBAUER, Christian (Mitarb.); PAST, Roman (Mitarb.); SARNY, Wolfgang (Mitarb.); SINGER, Erich (Mitarb.) : *Dezentrale Klärschlammverbrennung*. Wien, 2004 (ISBN 3-85457-756-7)
- [44] ŽNIDARČIČ, A. ; SELJAK, T. ; KATRAŠNIK, T.: *Surrogate model for improved simulations of small-scale sludge incineration plants*. In: *Fuel* 280 (2020), S. 118422. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120314186>
- [45] SCHNELL, Matthias ; HORST, Thomas ; QUICKER, Peter: *Thermische Verwertung von Klärschlamm : Überblick und Einordnung bestehender Verfahren*. In: HOLM, Olaf; THOMÉ-KOZMIENSKY, Elisabeth; QUICKER, Peter; KOPP-ASSENMACHER, Stefan (Hrsg.): *Verwertung von Klärschlamm*. Neuruppin : TK, 2018, S. 131–163
- [46] THOMSEN, Tobias Pape ; SÁROSSY, Zsuzsa ; GØBEL, Benny ; STOHL, Peder ; AHRENFELDT, Jesper ; FRANDSEN, Flemming Jappe ; HENRIKSEN, Ulrik Birk: *Low temperature circulating fluidized bed gasification and co-gasification of municipal sewage sludge. Part 1: Process*

- performance and gas product characterization*. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 66 (2017), S. 123–133
- [47] REHL, T. ; MÜLLER, J.: *Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies*. In: *Resources, Conservation and Recycling* 56 (2011), Nr. 1, S. 92–104. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344911001686> – Überprüfungsdatum 2020-07-27
- [48] DÖHLER, Helmut ; SCHLIEBNER, Patrick: *Verfahren und Wirtschaftlichkeit der Gärrestaufbereitung*. In: *KTBL-Schrift: Verwertung von Wirtschafts- und Sekundärrohstoffen in der Landwirtschaft – Nutzen und Risiken* (2006), Nr. 444, S. 199–2013. URL [https://orgprints.org/8350/1/S\\_444\\_titelei\\_komplett.indd.pdf](https://orgprints.org/8350/1/S_444_titelei_komplett.indd.pdf) – Überprüfungsdatum 2020-07-27
- [49] AMT DER NÖ LANDESREGIERUNG; Abteilung Siedlungswasserwirtschaft (Mitarb.): *Klärschlammbehandlung und -verwertung in Kleinregionen : - Allgemeine Kriterien und Empfehlungen*. St. Pölten, 2010
- [50] FRICKE, Klaus: *Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen*. Dessau-Roßlau, 2009
- [51] GEYER, Jürgen: Klärschlamm-trocknung in Deutschland : Stand und Perspektiven, Bd. 10. In: THOMÉ-KOZMIENSKY, Karl J.; BECKMANN, Michael (Hrsg.): *Energie aus Abfall*. Neuruppin : TK-Verl., 2013, S. 927–948
- [52] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL: *Klärschlamm-trocknung (Entwurf)*. Juni 2019. Hennef : DWA, 2019 (DWA-Merkblatt M 379)
- [53] SCHOLZ, Reinhard ; BECKMANN, Michael ; SCHULENBURG, Frank: *Abfallbehandlung in thermischen Verfahren : Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2001 (Teubner-Reihe UMWELT)
- [54] EISENMANN ANLAGENBAU GMBH & Co. KG: *Umwelttechnik*. Angebotsbroschüre. URL <https://www.eisenmann.com/de/medien/printmedien.html>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-07-31
- [55] PYREG GMBH: *Schlammrecycling - P500 für Klärschlamm*. URL <https://www.pyreg.de/sludge/>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-07-31
- [56] UC PROZESSTECHNIK GMBH: *HD-PAWA-THERM : Verfahren zur dezentralen Verwertung von kommunalen Klärschlämmen durch Erzeugung eines heizwertreichen Pyrolysegases*. Angebotsbroschüre. URL <http://www.ucgmbh.de/index.php?inhalt=17>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-08-01

- [57] GREENLIFE RESSOURCEN GMBH: *Recycling von Klärschlamm: Pyrolyse*. Angebotsbroschüre. URL <https://www.greenlife.co.at/downloads.html>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-08-01
- [58] NEXT GENERATION ELEMENTS GMBH: *T:CRACKER : Die dezentrale Lösung zur thermischen Klärschlammbehandlung*. URL <http://nge.at/footer/download/>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-08-01
- [59] ANDRITZ AG: *Drying technologies for sewage sludge*. EcoDry. URL <https://www.andritz.com/resource/blob/13600/75c56d2056bfb401e599a0130086dbd1/se-downloads-drying-technologies-for-sewage-sludge-web-en-data.pdf>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-08-01
- [60] AWINA INDUSTRIEANLAGEN GMBH: *AWINA-Technologie : Feuerungsanlage für Reststoffe und Biomasse*. Angebotsbroschüre. URL <http://awina-technik.at/cms/index.php/de/downloads-de>. – Aktualisierungsdatum: 2014 – Überprüfungsdatum 2020-08-01
- [61] SLUDGE2ENERGY GMBH: *S2E : Thermische Verwertungskonzepte für Klärschlamm*. Angebotsbroschüre. URL <https://www.sludge2energy.de/de/verfahren.html>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-08-02
- [62] VEOLIA WATER TECHNOLOGIES: *BioCon : Biosolids Drying & Energy Recovery*. Angebotsbroschüre. URL <http://www.veoliawatertech.com/news-resources/datasheets/46027.htm>. – Aktualisierungsdatum: 2017 – Überprüfungsdatum 2020-08-02
- [63] VEOLIA WATER TECHNOLOGIES: *Pyrofluid : Sludge incineration, energy recovery and ash recycling*. Angebotsbroschüre. URL <http://technomaps.veoliawatertechnologies.com/pyrofluid/de/>. – Aktualisierungsdatum: 2017 – Überprüfungsdatum 2020-08-02
- [64] WEHRLE-WERK AG: *Kleinanlagen zur dezentralen thermischen Verwertung von Klärschlamm als Vorstufe zum Phosphor-Recycling*. Angebotsbroschüre. URL <https://www.wehrle-werk.de/de/energie/kl%C3%A4rschlammverbrennung>. – Aktualisierungsdatum: 2019 – Überprüfungsdatum 2020-08-02
- [65] KOPF SYNGAS GMBH & CO KG: *SynGas Klärschlammverwertung : Das SynGas BHKW Modul*. Angebotsbroschüre. URL <https://kopf-syngas.de/downloadbereich>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-08-02

- [66] KOPF SYNGAS GMBH & Co KG: *SynGas Klärschlammverwertung : Das kompakte SynGas Heat Modul*. Angebotsbroschüre. URL <https://kopf-syngas.de/downloadbereich>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-08-02
- [67] LINDTNER, Stefan: *Leitfaden für die Erstellung eines Energiekonzeptes kommunaler Kläranlagen*. Wien, 2008
- [68] INSTITUT FÜR WASSERGÜTE, RESSOURCENMANAGEMENT U. ABFALLWIRTSCHAFT (Hrsg.); LINDTNER, Stefan (Mitarb.); VOHRZYKA, Fiona (Mitarb.) : *NEW: Nährstoffe – Energie – Wasser : Der Energieverbrauch österreichischer Kläranlagen*. ÖWAV Februar Seminar 2015. Wien : Technische Universität Wien, 2015 (Wiener Mitteilungen 232)
- [69] VETTER, Helmut ; BURGER, Sabine: *Energetische Optimierung der Klärschlammaufbereitung : Schlussbericht*. Bern, 2006
- [70] STADTENTWÄSSERUNG KOBLENZ: *SusTreat : Use of Immanent Energy in Self-Sustaining Sludge Treatment*. EU-Pilotprojekt. URL <https://sustreat.eu/ziele-technik/>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-01-04
- [71] SCHMITT, Theo G. ; KNERR, Henning ; DILLY, Timo ; HANSEN, Joachim ; HIEN, Sebastian ; SIEKMANN, Thomas ; JAKOB, Jürgen ; SIEKMANN, Klaus: *Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz*. ZEBRAS. 2018
- [72] BEKKER, Marina ; OECHSNER, Hans: *Betrieb einer Mikrogasturbine mit Biogas - praktische Erfahrungen*. 136–138 Seiten / LANDTECHNIK, Bd. 65 Nr. 2 (2010) / LANDTECHNIK, Bd. 65 Nr. 2 (2010) (2010). URL <https://www.landtechnik-online.eu/landtechnik/article/view/2010-65-2-136-138> – Überprüfungsdatum 2020-12-12
- [73] AHNERT, Markus ; ALEX, Jens ; DÜRRENMATT, David J. ; LANGERGRABER, Günter ; HOBUS, Inka ; SCHMUCK, Sebastian ; SPERING, Volker: *Dynamische Simulation als Bestandteil einer Kläranlagenbemessung nach DWA-A131 : Praxisanwendung des ASM3\_A131 und Fallbeispiele*. In: *KA Korrespondenz Abwasser Abfall* 62 (2015), Nr. 7, S. 615–624. URL [hsgsim.org/downloads/Ahnert\\_el\\_al\\_2015\\_DimSm\\_KA\\_Teil2.pdf](https://www.hsgsim.org/downloads/Ahnert_el_al_2015_DimSm_KA_Teil2.pdf) – Überprüfungsdatum 2021-08-03
- [74] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL: *Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen*. Juni 2016. Hennef : Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall, 2016 (DWA-Arbeitsblatt A 131)

- [75] DOHMANN, M.: *Bemessung der Stickstoffelimination : Bemessung der Belebungsbecken nach dem Ansatz der Hochschulgruppe (HSG-Ansatz)*; In: *Korrespondenz Abwasser Abfall* 1993, Nr. 8, 1240
- [76] UHLENHUT, Frank: *Modellierung der biologischen Abbauvorgängein Kläranlagen : ein neuer reaktionskinetischer Ansatz*. Oldenburg, Fachhochschule Ostfriesland, Naturwissenschaftliche Technik. Dissertation. 1999. URL <http://oops.uni-oldenburg.de/436/91/uhlmod99.pdf> – Überprüfungsdatum 2020-08-11
- [77] IFAK TECHNOLOGY + SERVICE GMBH: *Simba#*. Karlsruhe, 2018. URL <https://www.ifak.eu/de/produkte/simba-water> – Überprüfungsdatum 2020-08-11
- [78] ENVIROSIM ASSOCIATES LTD: *BioWin*. Hamilton, 2020. URL <https://envirosim.com/> – Überprüfungsdatum 2020-08-11
- [79] DYNAMITA SARL: *Sumo19*. Nyons, 2017. URL <https://www.environmental-expert.com/companies/dynamita-sarl-97127/> – Überprüfungsdatum 2020-08-11
- [80] REICHERT, P.: *AQUASIM : A tool for simulation and data analysis of aquatic systems*. Dübendorf, 2013. URL <https://www.eawag.ch/de/abteilung/siam/software/> – Überprüfungsdatum 2020-08-11
- [81] JUMAR, Ulrich: Klärende Simulation — Simulation für den Umweltschutz am Beispiel biologischer Kläranlagen. In: KRUG, Wilfried (Hrsg.): *Simulationstechnik : 10. Symposium in Dresden, September 1996 ; Tagungsband*. Braunschweig : Vieweg, 1996 (Fortschritte in der Simulationstechnik), S. 379–386
- [82] HENZE, Mogens ; GUJER, Willi ; MINO, Takashi ; LOOSDRECHT, Mark von: *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. Reprinted. London : IWA Publ, 2007 (Scientific and technical report / IWA 9)
- [83] HSGSIM: *Integrierte Modellierung von Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer : HSG-Leitfaden der Arbeitsgruppe Integrierte Modellierung zur integrierten Bewirtschaftung und Modellierung in der Siedlungswasserwirtschaft*. 1. Auflage. 2008
- [84] LEINWEBER, Ulla: *Anforderungen an die integrierte Modellierung von Entwässerungssystem und Kläranlage*. Kaiserslautern, Universität Kaiserslautern, Architektur/Raum- und Umwelplanung/Bauingenieurwesen. Dissertation. 2002. URL <https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/deliver/index/docId/1374/file/Band16.pdf> – Überprüfungsdatum 2020-08-11
- [85] AMERI, Billal ; HANINI, Salah ; BOUMAHDY, Mouloud: *Influence of drying methods on the thermodynamic parameters, effective moisture diffusion and drying rate of wastewater sewage sludge*. In: *Renewable Energy* (2020), Nr. 147, S. 1107–1119

- [86] YANG, Yao Bin ; SHARIFI, Vida ; SWITHENBANK, Jim: *Mathematical modelling of sewage sludge incineration in a bubbling fluidised bed with special consideration for thermally-thick fuel particles*. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 28 (2008), Nr. 11, S. 2245–2258
- [87] KHIARI, B. ; MARIAS, F. ; ZAGROUBA, F. ; VAXELAIRE, J.: *Use of a transient model to simulate fluidized bed incineration of sewage sludge*. In: *Journal of hazardous materials* 135 (2006), 1-3, S. 200–209
- [88] PETERSEN, I. ; WERTHER, J.: *Three-dimensional modeling of a circulating fluidized bed gasifier for sewage sludge*. In: *Chemical Engineering Science* (2005), Nr. 60, S. 4469–4484
- [89] SPARN, Bethany ; HUNSBERGER, Randolph: *Opportunities and Challenges for Water and Wastewater Industries to Provide Exchangeable Services*. Denver, 2015
- [90] EURELECTRIC: *Flexibility and Aggregation : Requirements for their interaction in the market*. A EURELECTRIC paper. Brüssel, 2014
- [91] AUSTRIAN POWER GRID AG: *Marktinformationen : Netzregelung*. URL <https://www.apg.at/de/markt/netzregelung>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-09-15
- [92] SCHÄFER, Michael: *Ein methodischer Ansatz zur Bereitstellung energetischer Flexibilität durch einen anpassungsfähigen Kläranlagenbetrieb*. Kaiserslautern : Technische Universität Kaiserslautern, 2019 (Schriftenreihe Wasser Infrastruktur Ressourcen Band 5)
- [93] LINKE, Bernd: *Entsorgung organischer Reststoffe durch Co-Fermentation*. 82–83 Seiten / *LANDTECHNIK*, Bd. 52 Nr. 2 (1997) / *LANDTECHNIK*, Bd. 52 Nr. 2 (1997) (1997) – Überprüfungsdatum 2020-12-06
- [94] HILLIGES, Rita ; KINSHOFER, Johanna; SCHREFF, Dieter (Mitarb.): *Anforderungen an die Schlammstabilisierung auf Kläranlagen*. F&E-Vorhaben 76e167. Augsburg, 2016
- [95] BUNDESMINISTER FÜR WIRTSCHAFTLICHE ANGELEGENHEITEN UND BUNDESMINISTER FÜR UMWELT: *1. Abwasseremissionsverordnung für kommunales Abwasser (idF v. vom 27. 1. 2021)*
- [96] MICROSOFT CORPORATION: *Microsoft Excel : für Microsoft 365 MSO*
- [97] THE MATHWORKS INC.: *MATLAB*
- [98] ASPEN TECHNOLOGY INC: *Aspen Plus®*. Cambridge, 2014

- [99] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL: *Sandfänge - Anforderungen, Systeme und Bemessungen*. Arbeitsbereich des DWA-Fachausschusses KA-5. In: *KA Korrespondenz Abwasser Abfall* 55 (2008), Nr. 5, S. 508–518
- [100] LANGERGRABER, G. ; ALEX, J. ; WEISSENBACHER, N. ; WOERNER, D. ; AHNERT, M. ; FREHMANN, T. ; HALFT, N. ; HOBUS, I. ; PLATTES, M. ; SPERING, V. ; WINKLER, S.: *Generation of diurnal variation for influent data for dynamic simulation*. In: *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 57 (2008), Nr. 9, S. 1483–1486. URL [https://www.researchgate.net/publication/5354350\\_Generation\\_of\\_diurnal\\_variation\\_for\\_influent\\_data\\_for\\_dynamic\\_simulation](https://www.researchgate.net/publication/5354350_Generation_of_diurnal_variation_for_influent_data_for_dynamic_simulation)
- [101] MAIER, Christoph ; SCHUSTER, Andreas ; LITZLBAUER, Markus ; GROß, Christoph ; ZEILINGER, Franz ; ÖSTERLE, Philipp ; GAWLIK, Wolfgang: *Demand-Side-Management in einer Modellsiedlung : Endergebnisse des Projekts aDSM, Bd. 9*. In: *Tagungsband zur Internationalen Energiewirtschaftstagung 2015, 2-14*
- [102] E-CONTROL: *Strompreisentwicklung : Berichtsjahr 2019*. URL <https://www.e-control.at/statistik/strom/marktstatistik/preisentwicklung>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-09-10
- [103] E-CONTROL: *Gaspreisentwicklung : Berichtsjahr 2019*. URL <https://www.e-control.at/statistik/gas/marktstatistik/preisentwicklung>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-09-10
- [104] OBERNBERGER, Ingwald ; SUPANCIC, Klaus ; POLZER, Andreas; WINTER, Ingrid (Mitarb.): *Untersuchung der Stoffflüsse und sinnvollen Verwertung von sowie Reststoffnutzung aus Klärschlamm in der Steiermark*. Endbericht. Graz, 2007
- [105] BUSSE VON COLBE, Walther ; WITTE, Frank: *Investitionstheorie und Investitionsrechnung*. 5., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin : Springer Gabler, 2018 (Lehrbuch)
- [106] RETTING, Adrian: *Aus Abwärme wird Strom : Organic Rankine Cycle-Technologie*. In: *Elektrotechnik* 11 (2011), Nr. 6, S. 36–39. URL <https://www.zhaw.ch/storage/engineering/institute-zentren/iefe/PDFs/orc-fachartikel-et036-aus-abwaerme-wird-strom.pdf> – Überprüfungsdatum 2021-01-10
- [107] BÄRNTHALER, J. ; BERGMANN, H. ; HORNBACHER, D. ; KONRAD, G. ; KRYVORUCHKO, V. ; TARGYIK-KUMER, T. ; PINTER, C. ; WARTHA, C.: *Gasversorgung mittels lokaler Biogas-Mikronetze*. Wien, 2009 (Berichte aus Energie- und Umweltforschung 51)
- [108] AUSTRIAN POWER GRID AG: *Marktforum der APG : Historische Präsentationen - Regelle Energiemarkt 2014-2018*. URL



<https://www.apg.at/de/markt/netzregelung/marktforum>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-10-14

- [109] AUSTRIAN POWER GRID AG: *Statistik der Netzregelung in der Regelzone APG : Balancing Statistics 2014-2018*. URL <https://www.apg.at/de/markt/netzregelung/statistik>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-10-14
- [110] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL: *Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen*. März 2006. Hennef : DWA, 2006 (DWA-Regelwerk A 118)
- [111] BEVER, Jürgen (Hrsg.): *Weitergehende Abwasserreinigung*. 4. Aufl. München : Oldenbourg-Industrieverl., 2002
- [112] PONDUS VERFAHRENSTECHNIK GMBH: *Diagramme und Tabellen aus dem Bereich der Schlammbehandlung : Schlammichte*. Ähhängigkeit der Schlammichte vom Trockenstoffgehalt und Glüeverlust. URL <http://www.pondus-verfahren.de/tabellen1.html>. – Aktualisierungsdatum: 2021 – Überprüfungsdatum 2021-01-18
- [113] *DIN 1343:1990-01: Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen; Begriffe und Werte*
- [114] STEPHAN, Peter (Hrsg.); KABELAC, Stephan (Hrsg.); KIND, Matthias (Hrsg.); MEWES, Dieter (Hrsg.); SCHABER, Karlheinz (Hrsg.); WETZEL, Thomas (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas : Fachlicher Träger VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen*. 12. Auflage. Berlin : Springer Vieweg, 2019 (VDI Springer Reference)
- [115] PILTZ, E. ; BECKER, E.: *Technische Strömungslehre : Eine Einführung in die Grundlagen und technischen Anwendungen der Strömungsmechanik*. 7., überarbeitete Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 1993 (Teubner-Studienbücher : Mechanik)
- [116] HUBER SE: *HUBER Technology : Rechengutbehandlung*. URL <https://www.huber.de/de/produkte/rechengutbehandlung.html>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-11-01
- [117] FIMML, Christian: *Fettbelastete Abwässer : Fettabscheidung auf der Kläranlage* (KAN - 16.Sprechertagung). Fachhochschule Hagenberg, 12.-13.09.2007. URL <https://docplayer.org/21134149-Fettbelastete-abwaesser-fettabscheidung-auf-der-klaeranlage.html> – Überprüfungsdatum 2021-02-18
- [118] HIRSCHBECK, Christina: *Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von belüfteten Sandfängen auf Kläranlagen*. München, Universität der Bundeswehr, Fakultät für

- Bauingenieur- und Vermessungswesen. Dissertation. 2009. URL <https://dnb.info/1001314131/34> – Überprüfungsdatum 2021-01-06
- [119] HUBER SE: *HUBER Technology : Sandabscheidung und Sandbehandlung*. URL <https://www.huber.de/de/produkte/sandabscheidung-behandlung.html>. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2020-11-01
- [120] LOLL, Ulrich ; MELSA, Armin ; BISCHOF, Fredy ; BLEI, Peter ; DENKERT, Ralf ; EVERS, Peter ; GLASENAPP, Joachim ; HRUSCHKA, Herbert ; KASSNER, Wolfram ; KOPP, Julia ; WOLF, Siegfried: *Klärschlammanfall und Bemessungsansätze: Neue erweiterte "Schlammliste*. In: *KA Korrespondenz Abwasser Abfall* 2004 (2004), (51) Nr.12, S. 1385–1390 – Überprüfungsdatum 2020-11-16
- [121] FREY, Wilhelm: *Vergleichende Betrachtung der Betriebsergebnisse von Druck- und Oberflächen-Belüftungssystemen in Österreich* (Abschlussseminar zum DBU-Projekt: Messverfahren für die Sauerstoffeintragsleistung in Belebungsbecken). Osnabrück, 08.-09.05.2006. URL [http://www.aabfrey.com/?page\\_id=37](http://www.aabfrey.com/?page_id=37) – Überprüfungsdatum 2020-11-26
- [122] HANSEN, Joachim ; GRETSCHEL, Oliver ; JAKOB, Jürgen ; SIEKMANN, Klaus: Betriebliche und energetische Aspekte von Schlammfäulung und -stabilisierung, Bd. 30. In: SCHMITT, Theo G. (Hrsg.): *Schlammfäulung statt aerober Stabilisierung : Trend der Zukunft?* Als Ms. gedr. Kaiserslautern : Technische Universität, 2011 (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technische Universität Kaiserslautern, 30), S. 1–23
- [123] BARTH, Matthias: *Erschließung von Biogaspotenzialen aus Überschussschlamm mit Hilfe der Kombination aus Desintegration und anaerober Schlammstabilisierung*. Dresden, Technische Universität Dresden, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften. Dissertation. 2011. URL <http://docplayer.org/19189481-Erschliessung-von-biogaspotenzialen-aus-ueberschussschlamm-mit-hilfe-der-kombination-aus-desintegration-und-anaerober-schlammstabilisierung.html> – Überprüfungsdatum 2020-11-16
- [124] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL: *Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen*. November 2010, Korrigierte Fassung Januar 2011. Hennef : DWA, 2011 (DWA-Regelwerk M 363)
- [125] FREY, Hartmut: Mikrogasturbine. In: Frey (Hrsg.): *Energieautarke Gebäude*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 479–483

- [126] KARL, Jürgen: *Dezentrale Energiesysteme : Neue Technologien im liberalisierten Energiemarkt*. 3., überarb. und erw. Aufl. Berlin, Boston : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2012 (Technik 10-2012)
- [127] VIDAL, Adrián ; CARLES BRUNO, Joan ; BEST, Roberto ; CORONAS, Alberto: *Performance characteristics and modelling of a micro gas turbine for their integration with thermally activated cooling technologies*. In: *International Journal of Energy Research* 31 (2007), Nr. 2, S. 119–134
- [128] DIN V 4701-12:2004-02, *Energetische Bewertung heiz- und raumlufthechnischer Anlagen im Bestand\_ - Teil\_12: Wärmeerzeuger und Trinkwassererwärmung*
- [129] PHYLLIS2: *Phyllis2 - Database for the physico-chemical composition of (treated) lignocellulosic biomass, micro- and macroalgae, various feedstocks for biogas production and biochar*. URL <https://phyllis.nl/>. – Aktualisierungsdatum: 2021-01-21 – Überprüfungsdatum 2021-01-21
- [130] SCHUSTER, A. ; KARELLAS, S. ; KAKARAS, E. ; SPLIETHOFF, H.: *Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications*. In: *Applied Thermal Engineering* 29 (2009), 8-9, S. 1809–1817. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431108003645>
- [131] BUTLER, Eoin ; SCHOPF, Kerstin: *Improving the Energetic Self-Sufficiency of Waste Water Treatment Plants : Tool for Needs-based Configuration of the Thermal Sludge Gasification Process*, Bd. 8. In: THOMÉ-KOZMIENSKY, Karl J.; THIEL, Stephanie; PELLONI, Luciano (Hrsg.): *Waste Management*. Neuruppin : TK-Verl., 2018, S. 443–454
- [132] KIENBERGER, Thomas: *Methanierung biogener Synthesegase mit Hinblick auf die direkte Umsetzung von höheren Kohlenwasserstoffen*. Zugl.: Graz, Techn. Univ., Diss., 2010. Als Ms. gedr. Düsseldorf : VDI-Verl., 2010 (Fortschrittberichte VDI : Reihe 6, Energietechnik Nr. 595)
- [133] UMWELTBUNDESAMT GMBH: *Flächeninanspruchnahme in Österreich 2019*. URL [https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/boden/flaechenverbrauch\\_2019.pdf](https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/boden/flaechenverbrauch_2019.pdf). – Aktualisierungsdatum: 2019 – Überprüfungsdatum 2020-10-02
- [134] MEIER, Hermann ; FÜNFELD, Christian ; ADAM, Thomas ; SCHIEFERDECKER, Bernd: *Repräsentative VDEW-Lastprofile*. Frankfurt, 1999
- [135] ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK: *Durchschnittliche Temperatur in Österreich von Sommer 2014 bis Sommer 2020*. URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1088709/umfrage/temperatur-in->

oesterreich-nach-jahreszeiten/#professional. – Aktualisierungsdatum: 2020 –  
Überprüfungsdatum 2020-10-01

- [136] SIMON MOSER ; HORST STEINMÜLLER ; KARL-HEINZ LEITNER ; RENE HOFMANN ; SOPHIE PANUSCHKA ; THOMAS KIENBERGER ; CHRISTOPH SEJKORA ; MARKUS HAIDER ; ANDREAS WERNER ; CHRISTOPH BRUNNER ; JÜRGEN FLUCH ; ANNA GRUBBAUER: *Renewables4Industry - Abstimmung des Energiebedarfs von industriellen Anlagen und der Energieversorgung aus fluktuierenden Erneuerbaren : Endbericht*, 2018
- [137] PIETSCH, Manuel: *Optimierung eines Photovoltaikspeichers. Vergleich diverser Operationsstrategien zur Kostenminimierung*. 1. Auflage. Hamburg : Diplomica Verlag, 2016
- [138] HÖFNER, Peter: *Vergleich strom- und wärmegeführter Betriebsweise eines BHKW im Nahwärmenetz mit Langzeitwärmespeicher*. Wien, Universität für Bodenkultur, Institut für Verfahrens- und Energietechnik. Masterarbeit. 2019 – Überprüfungsdatum 2021-01-21
- [139] VOPAFA, Julia ; BÖCKL, Benjamin ; KRIECHBAUM, Lukas ; KIENBERGER, Thomas: *Anwendung zellularer Ansätze bei der Gestaltung zukünftiger Energieverbundsysteme*. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 134 (2017), Nr. 3, S. 238–245
- [140] ENERGIE STEIERMARK KUNDNE GMBH: *Informations- und Preisblatt für die Abnahme von Strom aus Photovoltaik für Überschusseinspeisung : E1-Sonne Plus*. Stand 1.4.2021. URL [https://www.e-steiermark.com/fileadmin/user\\_upload/downloads/Strom\\_E1\\_Sonne\\_Plus.pdf](https://www.e-steiermark.com/fileadmin/user_upload/downloads/Strom_E1_Sonne_Plus.pdf). – Aktualisierungsdatum: 2021-04-01 – Überprüfungsdatum 2021-09-21
- [141] KLIMA- UND ENERGIEFONDS: *Benefit-Tool für Photovoltaik und Speicher für Energiegemeinschaften*. URL <https://energiegemeinschaften.gv.at/benefit-tool/>. – Aktualisierungsdatum: 2021 – Überprüfungsdatum 2021-09-18
- [142] ASUE ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHEN ENERGIEVERBRAUCH E.V.: *Mikrogasturbinen : Technologie, Kenndaten, Anwendungen*. URL [https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/gasturbinen/2019/broschueren/ASUE-Broschuere\\_Mikrogasturbinen\\_2019.pdf](https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/gasturbinen/2019/broschueren/ASUE-Broschuere_Mikrogasturbinen_2019.pdf). – Aktualisierungsdatum: 2021 – Überprüfungsdatum 2021-03-01

# 10 ANHANG

## 10.1 Aggregatspezifische Flexibilitätsparameter

Tabelle 10-1: Aggregatspezifische Flexibilitätsparameter nach Schäfer [92]

Aggregat	Abschaltdauer		Zuschaltdauer		Re- generations- zeit	An- fahr- zeit	Ab- fahr- zeit
	min [min]	max [min]	min [min]	max [min]			
Zulaufpumpwerk	5	15	-	-	30	60	60
Sandfanggebläse	5	60	-	-	30	60	60
Belüftung (Belebungsbecken)	5	60 <sup>1</sup> /120 <sup>2</sup>	-	-	15	60	60
Umwälzung (Belebungsbecken)	15	30	15	40	30	60	60
Rezirkulation	5	720	-	-	30	60	60
Rücklauf- schlammpumpe	5	120	-	-	60	60	60
Rührwerke (Faulturm)	15	30	-	-	15	180	60
Heizschlammpumpe (Faulturm)	15	1.440	15	1.440	60	60	60
Rohschlammpumpe (Faulturm)	15	30	-	-	15	120	60
Siebband/Siebtrommel (Eindicker)	-	-	120	1.440	15	60	900
Zentrifuge (Entwässerung)	-	-	240	420	60	1.200	1.200
Kammerfilterpresse (Entwässerung)	-	-	150	150	60	120	120
BHKW	5	1.440	60	1.440	5 <sup>3</sup> /30 <sup>4</sup>	180	300
1 Anlagen mit anaerober Schlammstabilisierung			3 Negative Flexibilität				
2 Anlagen mit aerober Schlammstabilisierung			4 Positive Flexibilität				

## 10.2 Bewertung der Beeinflussung und Nutzbarkeit flexibler Aggregate bei Regenwetterzufluss

Tabelle 10-2: Bewertung der Beeinflussung und Nutzbarkeit flexibler Aggregate bei Regenwetterzufluss nach Schäfer [92]

Aggregat	Einfluss	Nutzbarkeit	Anfahrzeit
Zulaufpumpwerk	●●●	○	< 5 min
Sandfanggebläse	●●●	○	< 5 min
Belüftung (Belebungsbecken)	●●	○	< 5 min
Umwälzung (Belebungsbecken)	●	●●	< 5 min
Rezirkulation	●●	○	< 5 min
Rücklauf- schlammpumpe	●●	○	< 5 min
Rührwerke (Faulturm)	○	●●	< 5 min
Heizschlammpumpe (Faulturm)	○	●●	< 5 min
Rohschlammpumpe (Faulturm)	○	●●	< 5 min
Siebband/Siebtrommel (Eindicker)	○	●	< 15 min
Entwässerung	○	●●●	< 15 min
BHKW	○	●●●	< 15 min
○ gering	● mäßig	●● hoch	●●● sehr hoch

## 10.3 Strom- und Erdgaspreis für Nicht-Haushaltskunden in Österreich im Jahr 2019

*Tabelle 10-3: Strompreis für Nicht-Haushaltskunden in Österreich im Jahr 2019 [102]*

Jahresbedarf	Gesamtpreis 2019 [Cent/kWh]		
	1. Halbjahr	2. Halbjahr	Durchschnitt
Nicht Haushalte insgesamt	11,812	11,638	11,725
Nicht Haushalte bis 20 MWh/a	19,761	19,087	19,424
Nicht Haushalte von 20 bis 500 MWh/a	15,198	15,152	15,175
Nicht Haushalte von 500 bis 2.000 MWh/a	12,908	13,048	12,978
Nicht Haushalte von 2.000 bis 4.000 MWh/a	11,958	11,906	11,932
Nicht Haushalte von 4.000 bis 20.000 MWh/a	11,180	11,339	11,260
Nicht Haushalte von 20.000 bis 70.000 MWh/a	9,989	10,120	10,055
Nicht Haushalte von 70.000 bis 150.000 MWh/a	9,302	9,359	9,331
Nicht Haushalte über 150.000 MWh/a	8,604	8,528	8,566

*Tabelle 10-4: Gaspreis für Nicht-Haushaltskunden in Österreich im Jahr 2019 [103]*

Jahresbedarf	Gesamtpreis 2019 [Cent/kWh]		
	1. Halbjahr	2. Halbjahr	Durchschnitt
Nicht Haushalte insgesamt	3,340	2,994	3,167
Nicht Haushalte bis 278 MWh/a	5,868	6,048	5,958
Nicht Haushalte von 278 bis 400 MWh/a	5,278	5,300	5,289
Nicht Haushalte von 400 bis 2.778 MWh/a	4,760	4,830	4,795
Nicht Haushalte von 2.778 bis 5.595 MWh/a	4,345	4,230	4,287
Nicht Haushalte von 5.595 bis 27.778 MWh/a	3,794	3,564	3,679
Nicht Haushalte von 27.778 bis 277.778 MWh/a	3,212	3,043	3,127
Nicht Haushalte von 277.778 bis 1.111.111 MWh/a	2,974	2,774	2,874
Nicht Haushalte über 1.111.111 MWh/a	2,862	2,347	2,605

## 10.4 Modul „Zulaufpumpwerk“ – Inputparameter & Literaturwerte

**Tabelle 10-5: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Zulaufpumpwerk“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB)**

Inputparameter	Einheit	Einfluss auf die	
		MB	EB
Art der Pumpe	-		X
Mittlere stündliche Fördermenge	m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	X	
Förderhöhe	m		X
Elektrische Nennleistung	kW		X
Auslastungsgrad	%		X
Volllaststunden	ha <sup>-1</sup>		X

**Tabelle 10-6: Gesamtwirkungsgrad der im Modul „Zulaufpumpwerk“ auswählbaren Pumpenarten**

Art der Pumpe	Gesamtwirkungsgrad $\eta_{\text{ges}}$ ( $\eta_{\text{Pumpe}} + \eta_{\text{Motor}}$ ) [17]		
	min	max	Durchschnitt
Schneckenrotpumpe	0,46	0,55	0,51
Kreiselpumpe - Wirbelrad	0,41	0,51	0,46
Kreiselpumpe - Einkanalrad	0,46	0,55	0,51
Propeller-/Rohrgehäusepumpe	0,60	0,73	0,67
Durchschnitt der Pumpenarten	0,48	0,59	0,53

**Tabelle 10-7: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Zulaufpumpwerk“**

Parameter	Wert	Einheit	Anmerkung	Quelle
Druckdifferenz $\Delta p$	0,00	kgm <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>		
Höhendifferenz $\Delta h$	5,00	m	Angenommene	nach
Strömungsgeschwindigkeit am Rohrein- und -ausgang $v_1, v_2$	1,00	ms <sup>-1</sup>	Auslegungswerte	[26]
Zetawert $\zeta$	1,62	-		
dynamische Viskosität $\mu$	0,05	kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	Angenommene	nach
Schubspannung $s_y$	1,30	kgm <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>	Auslegungswert	[24]
Volllaststunden $t$	8.760,00	ha <sup>-1</sup>	-	[11]



## 10.5 Modul „Rechenanlage“ – Inputparameter & Literaturwerte

**Tabelle 10-8: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Rechenanlage“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB)**

Inputparameter	Einheit	Einfluss auf die	
		MB	EB
<b>Rechen</b>			
Art des Rechens	-	X	X
Mittlerer stündlicher Durchfluss	m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	X	X
Elektrische Nennleistung	kW		X
Auslastungsgrad	%		X
Volllaststunden	ha <sup>-1</sup>		X
<b>Rechengutwaschanlage</b>			
Mittlerer täglicher Rechengutanfall	m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
Elektrische Nennleistung	kW		X
Auslastungsgrad	%		X
Volllaststunden	ha <sup>-1</sup>		X

**Tabelle 10-9: Spezifischer Rechengutvolumenstrom und Elektrizitätsverbrauch im Modul „Rechenanlage“**

Aggregat	min	max	Durchschnitt
	Spez. Rechengutvolumenstrom pro 1.000 m <sup>3</sup> Abwasser [m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ] [24]		
Grobrechen (50 mm)	0,004	0,011	0,008
Feinrechen (12,5 mm)	0,037	0,074	0,056
Sieb (6 mm)	0,051	0,100	0,076
Sonstige	0,031	0,062	0,046
<b>Spez. Elektrizitätsverbrauch pro m<sup>3</sup> Abwasser [Whm<sup>-3</sup>] [22, 116]</b>			
Siebe und Rechen	0,54	2,16	1,35
<b>Spez. Elektrizitätsverbrauch pro m<sup>3</sup> Rechengut [kWhm<sup>-3</sup>] [22, 116]</b>			
Rechengutwaschanlage	-	-	3,33

**Tabelle 10-10: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Rechenanlage“**

Parameter	Wert	Einheit	Anmerkung	Quelle
Rechengutdichte $\rho_{RG}$	1.100,00	kgm <sup>-3</sup>	Mittelwert	[24]
Trockengehalt des Rechengutes $TG_{RG}$	28,00	%	Mittelwert	[24]
Volllaststunden Rechen $t_R$ & -gutwaschanlage $t_{RGWA}$	1.460,00	ha <sup>-1</sup>	-	[11]

## 10.6 Modul „Sand- und Fettfang“ – Inputparameter & Literaturwerte

**Tabelle 10-11: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Sand- und Fettfang“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB)**

Inputparameter	Einheit	Einfluss auf die	
		MB	EB
<b>Sand- und Fettfangbecken</b> (Gebläse, Räumern und Pumpen)			
Sandfangart (belüftet/unbelüftet)	-		X
Art des Gebläses (bei Art = belüftet)	-		X
Lufteintrag des Gebläses (bei Art = belüftet)	$\text{Nm}^3\text{m}_{\text{SF}}^{-3}\text{h}^{-1}$		X
Elektrische Nennleistung	kW		X
Auslastungsgrad	%		X
Volllaststunden	$\text{ha}^{-1}$		X
<b>Sandwaschanlage</b>			
Mittlerer täglicher Sandanfall	$\text{m}^3\text{d}^{-1}$	X	X
Elektrische Nennleistung	kW		X
Auslastungsgrad	%		X
Volllaststunden	$\text{ha}^{-1}$		X

**Tabelle 10-12: Spezifischer Sand- und Fettvolumenstrom, sowie spezifische Leistung der Sandfangräumer und spezifischer Elektrizitätsverbrauch der Sandwaschanlage zur Ermittlung der Massen- und Energieströme im Modul „Sand- und Fettfang“**

Aggregat	min	max	Durchschnitt
<b>Spez. Fettvolumenstrom [<math>\text{m}^3\text{EW}^{-1}\text{a}^{-1}</math>] [117]</b>			
Fettfang	0,002	0,006	0,004
<b>Spez. Sandvolumenstrom pro 1.000 <math>\text{m}^3</math> Abwasser [<math>\text{m}^3\text{m}^{-3}</math>] [24]</b>			
Sandfang	0,004	0,200	0,102
<b>Spez. Leistung pro Sandfangbecken [kW] [17]</b>			
Sandfangräumer	0,300	1,000	0,650
<b>Spez. Elektrizitätsbedarf pro <math>\text{m}^3</math> Sand [<math>\text{kWhm}^{-3}</math>] [119]</b>			
Sandwaschanlage	-	-	7,500

Tabelle 10-13: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Sand- und Fettfang“

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
<b>Massenbilanz</b>			
Fettdichte $\rho_F$	1.100,00	kgm <sup>-3</sup>	[24]
Dichte Sand $\rho_S$	1.100,00	kgm <sup>-3</sup>	
Trockengehalt Sand $TG_S$	40,00	%	[119]
<b>Energiebilanz</b>			
Volllaststunden Gebläse $t_{SFFGebläse}$	8.760,00	ha <sup>-1</sup>	[11]
Volllaststunden Räumler $t_{SFFRäumler}$	1.460,00	ha <sup>-1</sup>	
Volllaststunden Pumpen $t_{SFFPumpen}$	1.460,00	ha <sup>-1</sup>	
Volllaststunden Sandwaschanlage $t_{SWA}$	1.460,00	ha <sup>-1</sup>	

## 10.7 Modul „Vorklärbecken“ – Inputparameter & Literaturwerte

Tabelle 10-14: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Vorklärbecken“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB)

Inputparameter	Einheit	Einfluss auf die	
		MB	EB
<b>Allgemein</b>			
Aufenthaltsdauer	h	X	X
CSB-/TP-/TN-/abfiltrierbare Stoffe-Abtrenngrad	%	X	X
PS-Trockensubstanz	gTSEW <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
PS-Trockengehalt	%	X	X
<b>Pumpen und Räumler</b>			
Art der PS-Pumpe	-		X
Elektrische Nennleistung	kW		X
Auslastungsgrad	%		X
Volllaststunden	ha <sup>-1</sup>		X

Tabelle 10-15: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Vorklärbecken“

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
<b>Energieströme</b>			
Volllaststunden Räumler $t_{Räumler}$	1.460,00	ha <sup>-1</sup>	[11]
Volllaststunden Pumpen $t_{Pumpen}$	8.760,00	ha <sup>-1</sup>	

Tabelle 10-16: Abtrenngrade im Vorklärbecken nach Aufenthaltszeit gemäß Arbeitsblatt DWA-A 131 [74]

Inhaltsstoff	Abtrenngrad in [%] [74]		
	Aufenthaltszeit in [h]		
	0,00-1,50	1,50-2,00	> 2,00
$C_{CSB}$	30 %	35 %	40 %
$X_{CSB}$	45 %	55 %	60 %
$X_{TS}$	50 %	60 %	65 %
$C_P$	10 %	10 %	10 %
$C_{TKN}$	10 %	10 %	10 %

## 10.8 Modul „Belebungsbecken“ – Inputparameter & Literaturwerte

Tabelle 10-17: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Belebungsbecken“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB)

Inputparameter	Einheit	Einfluss auf die	
		MB	EB
<b>Allgemein</b>			
Beckenvolumen	$m^3$	X	X
Art der Denitrifikation	-	X	X
Art der Belüftung	-	X	X
Schlammalter	d	X	X
Kohlenstoffquelle	-	X	X
BSB5:N-Verhältnis	-	X	X
SS-Trockensubstanz	$gTSEW^{-1}d^{-1}$	X	X
SS-Trockengehalt	%	X	X
<b>Gebläse</b>			
Art des Gebläses	-		X
Lufteintrag des Gebläses	$Nm^3h^{-1}$		X
<b>RZS-Pumpen</b>			
Fördermenge	$m^3h^{-1}$	X	X
<b>Gebläse, Umwälzung und RZS-Pumpen</b>			
Elektrische Nennleistung	kW		X
Auslastungsgrad	%		X
Volllaststunden	$ha^{-1}$		X

Tabelle 10-18: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Belebungsbecken“

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
<b>Massenbilanz</b>			
Konzentration des ablaufenden Nitratstickstoffes $S_{NO_3,AN}$	10,00	mg l <sup>-1</sup>	
Trockensubstanz im Rücklaufschlamm $TS_{RS}$	7,15	kg m <sup>-3</sup>	
Trockensubstanz im Belebungsbecken $TS_{BB}$	3,50	kg m <sup>-3</sup>	[74]
Wachstumsrate für die Nitrifikation $\mu_{A,max}$	0,47	-	
Prozessfaktor für die Nitrifikation $PF$	1,45	-	
Tiefenfaktor Druckbelüftung $f_{d,DB}$	1,22	-	
Tiefenfaktor Oberflächenbelüftung $f_{d,OB}$	1,03	-	[17]
Grenzflächenfaktor Druckbelüftung $\alpha_{DB}$	0,63	-	
Grenzflächenfaktor Oberflächenbelüftung $\alpha_{OB}$	0,93	-	[24]
Sauerstoffsättigungskonzentration bei 20°C $C_{S,20}$	9,09	mg l <sup>-1</sup>	
Einblastiefe $h_{BB}$	4,5	m	[17]
<b>Energiebilanz</b>			
Volllaststunden Gebläse $t_{BBG\text{ebläse}}$	8.760,00	ha <sup>-1</sup>	
Volllaststunden Umwälzung $t_{BBU\text{mwälzung}}$	8.760,00	ha <sup>-1</sup>	[11]
Volllaststunden RZS-Pumpen $t_{RZSP\text{umpen}}$	8.760,00	ha <sup>-1</sup>	

Tabelle 10-19: Spezifischer Elektrizitätsbedarf der Umwälzung im Modul „Belebungsbecken“

Vorklärbeckenvolumen [m <sup>3</sup> ]	Spez. Elektrizitätsbedarf [Wm <sup>-3</sup> ]		
	min	max	Durchschnitt
bis 500	5,00	8,00	6,50
501 bis 1.000	4,00	5,00	4,50
1.001 bis 2.000	3,00	4,00	3,50
ab 2.001	2,00	3,00	2,50

## 10.9 Modul „Phosphorelimination“ – Inputparameter & Literaturwerte

*Tabelle 10-20: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Phosphorelimination“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB)*

Inputparameter	Einheit	Einfluss auf die	
		MB	EB
<b>Allgemein</b>			
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	X	X
Fällmittel	-	X	X
TTS-Trockensubstanz	gTSEW <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
TTS-Trockengehalt	%	X	X
<b>Umwälzung</b>			
Elektrische Nennleistung	kW		X
Auslastungsgrad	%		X
Volllaststunden	ha <sup>-1</sup>		X

## 10.10 Modul „Nachklärbecken“ – Inputparameter & Literaturwerte

*Tabelle 10-21: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Nachklärbecken“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB)*

Inputparameter	Einheit	Einfluss auf die	
		MB	EB
<b>Allgemein</b>			
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>		X
<b>Räumer, RLS-, SS- und TTS-Pumpen</b>			
Fördermenge der Pumpe	m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	X	X
Elektrische Nennleistung	kW		X
Auslastungsgrad	%		X
Volllaststunden	ha <sup>-1</sup>		X

## 10.11 Modul „Eindicker“ – Inputparameter & Literaturwerte

*Tabelle 10-22: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Voreindicker“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB)*

Inputparameter	Einheit	Einfluss auf die	
		MB	EB
<b>Allgemein</b>			
NS-Trockensubstanz	gTSEW <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
NS-Trockengehalt	%	X	X
<b>PS-, SS-, TTS- und Co-Substrat-Eindicker</b>			
Art des Eindickers	-	X	X
Elektrische Nennleistung	kW		X
Auslastungsgrad	%		X
Volllaststunden	ha <sup>-1</sup>		X
Einsatz Flockungshilfsmittel	-	X	X
<b>Co-Substrat</b>			
Art des Co-Substrates	-	X	X
Tägliche mittlere Zugabe	m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
Dichte	kgm <sup>-3</sup>	X	X
Trockensubstanz	mg <sup>l</sup> . <sup>1</sup>	X	X
Organischer Trockensubstanzanteil	%	X	X
CSB-Konzentration	mg <sup>l</sup> . <sup>1</sup>	X	X
Gelöster Anteil der CSB-Konzentration	%	X	X
TP-Konzentration	mg <sup>l</sup> . <sup>1</sup>	X	X
TN-Konzentration	mg <sup>l</sup> . <sup>1</sup>	X	X

**Tabelle 10-23: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Eindicker“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB)**

Inputparameter	Einheit	Einfluss auf die	
		MB	EB
<b>Allgemein</b>			
NS-Trockensubstanz	gTSEW <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
NS-Trockengehalt	%	X	X
Mittlerer täglicher Trübwasseranfall	m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
CSB-Fracht Trübwasser	gEW <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
TP-Fracht Trübwasser	gEW <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
TN-Fracht Trübwasser	gEW <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
<b>NS-Eindicker</b>			
Art des Eindickers	-	X	X
Elektrische Nennleistung	kW		X
Auslastungsgrad	%		X
Volllaststunden	ha <sup>-1</sup>		X
Einsatz Flockungshilfsmittel	-	X	X

**Tabelle 10-24: Literaturwerte zu der Trockensubstanz (TS), dem organischen TS-Anteil, sowie der CSB-, TP- und TN-Konzentration von Co-Substraten im Modul „Voreindicker“ [122]**

Co-Substrat	TS	organischer TS-Anteil	CSB- Konzentration	TP- Konzentration	TN- Konzentration
	gm <sup>-3</sup>	%	gm <sup>-3</sup>	gm <sup>-3</sup>	gm <sup>-3</sup>
Gülle	5 300,00	0,70	56 410,00	-	2 440,00
Fettabfälle	7 570,00	0,83	112 170,00	-	1 810,00
Bioabfälle	8 560,00	0,76	122 240,00	-	2 050,00
Fremdschlämme	10 000,00	0,76	96 940,00	9 995,32	7 845,82



**Tabelle 10-25: Literaturwerte zu dem erreichbaren Trockengehalt, sowie dem spezifischen Elektrizitäts- und Flockungshilfsmittelbedarf der Module „Voreindicker“ und „Eindicker“ [30]**

Eindicker	Erreichbarer Trockengehalt [-]		Spezifischer Elektrizitätsbedarf [kWhm <sup>-3</sup> Schlamm]		spezifischer Flockungshilfsmittelbedarf [kg <sup>-1</sup> TS]
	min	max	min	max	
Durchlaufeindicker	0,02	0,04	0,05	0,10	1,75
Standeindicker	0,02	0,04	0,05	0,30	1,75
Druckentspannungsflotation	0,03	0,05	0,60	1,20	1,75
Bandeindicker	0,05	0,07	0,10	0,20	5,00
Trommeleindicker	0,05	0,07	0,10	0,20	5,00
Schneckeneindicker	0,05	0,07	0,10	0,20	5,00
Scheibeneindicker	0,05	0,07	0,10	0,20	5,00
Eindickungs-Pumpe	0,05	0,07	0,10	0,20	5,00
Zentrifuge	0,05	0,08	0,60	1,40	1,25

## 10.12 Modul „Faulturm“ – Inputparameter & Literaturwerte

**Tabelle 10-26: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Faulturm“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB)**

Inputparameter	Einheit	Einfluss auf die	
		MB	EB
<b>Allgemein</b>			
NS-Trockensubstanz	gTSEW <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
NS-Trockengehalt	%	X	X
Faulraumvolumen	m <sup>3</sup>	X	X
Mittlere Faulraumtemperatur	°C	X	X
Mittlere Faulzeit	d	X	X
Mittlerer täglicher Faulgasanfall	Nm <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
Mittlere Faulgaszusammensetzung (CH <sub>4</sub> -, CO <sub>2</sub> -, H <sub>2</sub> S- und N <sub>2</sub> -Anteil)	%		X
Unterer Faulgasheizwert	kWhNm <sup>3</sup>		X
Jährlicher Wärmebedarf	kWha <sup>-1</sup>		X
<b>Pumpen und Rührwerke</b>			
Elektrische Nennleistung	kW		X
Auslastungsgrad	%		X
Volllaststunden	ha <sup>-1</sup>		X

Tabelle 10-27: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Faulturm“

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
<b>Massenbilanz</b>			
Min. spez. Elektrizitätsbedarf pro m <sup>3</sup> NS $E_{el,FT,NS,min}$	1,60	kWhm <sup>-3</sup>	
Max. spez. Elektrizitätsbedarf pro m <sup>3</sup> NS $E_{el,FT,NS,max}$	2,30	kWhm <sup>-3</sup>	
Spez. Wärmebedarf pro m <sup>3</sup> NS $E_{th,FT,NS}$	1,16	kWhm <sup>-3</sup> K <sub>1</sub>	[17]
Min. spez. Wärmeverluste pro m <sup>2</sup> Oberfläche $E_{th,FT,V,min}$	2,63	kWm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	
Min. spez. Wärmeverluste pro m <sup>2</sup> Oberfläche $E_{th,FT,V,min}$	4,38	kWm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	
Oberflächen-Volumen-Verhältnis $OVV$	0,80	-	[27]
Volllaststunden Faulturm $t_{Faulturm}$	8.760,00	ha <sup>-1</sup>	Annahme nach [11]

### 10.13 Modul „Entwässerung“ – Inputparameter & Literaturwerte

Tabelle 10-28: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Entwässerung“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB)

Inputparameter	Einheit	Einfluss auf die	
		MB	EB
NS-Trockensubstanz	gTSEW <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
NS-Trockengehalt	%	X	X
Mittlerer täglicher Trübwasseranfall	m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
CSB-Fracht Trübwasser	gEW <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
TP-Fracht Trübwasser	gEW <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
TN-Fracht Trübwasser	gEW <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
Art des Entwässerungsaggregates	-	X	X
Elektrische Nennleistung	kW		X
Auslastungsgrad	%		X
Volllaststunden	ha <sup>-1</sup>		X

**Tabelle 10-29: Literaturwerte zu dem erreichbaren Trockengehalt, sowie dem spezifischen Elektrizitätsbedarf des Moduls „Entwässerung“ [17, 31]**

Entwässerungsaggregat	Erreichbarer Trockengehalt [-]		Spezifischer Elektrizitätsbedarf [kWhm <sup>-3</sup> Schlamm]	
	min	max	min	max
Hochleistungszentrifuge	0,25	0,35	1,30	1,80
Hydraulische Schlauchfilterpresse	0,32	0,40	1,60	1,80
Kammerfilterpresse	0,28	0,40	1,00	2,20
Membranfilterpresse	-	0,40	1,20	3,40
Schneckenpresse	0,23	0,28	0,30	0,50
Siebbandpresse	0,23	0,28	0,35	0,80

## 10.14 Modul „Faulgasnutzung“ – Inputparameter & Literaturwerte

**Tabelle 10-30: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Faulgasnutzung“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB)**

Inputparameter	Einheit	Einfluss auf die	
		MB	EB
<b>Faulgasspeicher</b>			
Faulgasspeichervolumen	Nm <sup>3</sup>	X	X
Mittlerer täglicher Faulgasvolumenstrom zur Fackel	Nm <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
<b>Faulgasreinigung</b>			
Gastrocknung (Ja/Nein)	-	X	X
Trockenentschwefelung (Ja/Nein)	-	X	X
Siloxanentfernung (Ja/Nein)	-	X	X
<b>Thermische Faulgasverwertung</b>			
Art des Verwertungsaggregates	-	X	X
Mittlerer täglicher Faulgasvolumenstrom	Nm <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
Mittlerer täglicher Erdgasvolumenstrom	Nm <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
Volllaststunden	ha <sup>-1</sup>		X
Jährliche Aufbringung elektrische Energie	kWha <sup>-1</sup>		X
Jährliche Aufbringung thermische Energie	kWha <sup>-1</sup>		X

Tabelle 10-31: Elektrischer und thermischer FG-BHKW-Wirkungsgrad nach elektrischer Nennleistung [17]

BHKW-Leistung [kW <sub>el</sub> ]	min	max	Durchschnitt
<b>Elektrischer Wirkungsgrad [-]</b>			
<30	0,25	0,32	0,29
30-50	0,30	0,34	0,32
51-100	0,32	0,38	0,35
101-250	0,36	0,39	0,38
>250	0,37	0,43	0,40
<b>Thermischer Wirkungsgrad [-]</b>			
<30	0,59	0,67	0,63
30-50	0,53	0,65	0,59
51-100	0,39	0,56	0,48
101-250	0,40	0,53	0,47
>250	0,39	0,52	0,46

Tabelle 10-32: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Faulgasnutzung“

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
<b>Energiebilanz BHKW</b>			
Volllaststunden $t_{FGBHKW}$	8.760,00	ha <sup>-1</sup>	[11]
<b>Energiebilanz MGT</b>			
Verbrennungsluftverhältnis $\lambda$	5,00	-	[127]
Druck am Eingang zum Verdichter $p_1$	1,00	bar	
Druck am Ausgang zum Verdichter $p_2$	5,00	bar	[142]
isentropen Verdichterwirkungsgrad $\eta_V$	0,74	-	
isentropen Turbinenwirkungsgrad $\eta_T$	0,86	-	[127]
Isentropenkoeffizient von Luft bei 0°C $\kappa$	1,80	-	
Abgastemperatur $T_{AG}$	300,00	°C	[127, 142]
Volllaststunden $t_{FGMGT}$	8.760,00	ha <sup>-1</sup>	Annahme nach [11]
<b>Energiebilanz HK</b>			
Volllaststunden $t_{FGHK}$	8.760,00	ha <sup>-1</sup>	Annahme nach [11]

## 10.15 Modul „Trockner“ – Inputparameter & Literaturwerte

**Tabelle 10-33: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Trockner“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB)**

Inputparameter	Einheit	Einfluss auf die	
		MB	EB
Art des Trockners	-	X	X
NS-Trockensubstanz	gTSEW <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
NS-Trockengehalt	%	X	X
Jährlicher Elektrizitätsbedarf	kWha <sup>-1</sup>		X
Jährlicher Wärmebedarf	kWha <sup>-1</sup>		X
Abwärmenutzung (Ja/Nein)	-		X
Jährliche nutzbare Abwärme	kWha <sup>-1</sup>		X
Volllaststunden	ha <sup>-1</sup>		X

**Tabelle 10-34: Literaturwerte zu dem erreichbaren Trockengehalt, sowie dem Anteil an rückführbarer Abwärme am Wärmebedarf im Modul „Trockner“**

Eindicker	Erreichbarer Trockengehalt [-] [104]		Anteil an rückführbarer Abwärme am Wärmebedarf [-] [69]
	min	max	
	Bandrockner (Abgas als Trocknungsmedium)	0,75	
Bandrockner (Luft als Trocknungsmedium)	0,75	0,98	0,36
Niedertemperaturbandrockner	0,60	0,95	0,36
Dünnschichttrockner	0,35	0,95	0,09
Scheibentrockner	0,35	0,95	0,37
Solare Trocknung	0,50	0,95	-
Trommeltrockner	0,92	0,95	0,35
Wirbelschichttrockner	0,85	0,96	0,25

Tabelle 10-35: Literaturwerte zu dem spezifischen Elektrizitäts- und Wärmebedarf im Modul „Trockner“ [69]

Eindicker	Spezifischer Elektrizitätsbedarf [kWh <sup>t</sup> <sup>-1</sup> WV]		Spezifischer Wärmebedarf [kWh <sup>t</sup> <sup>-1</sup> WV]	
	min	max	min	max
Bandrockner (Abgas als Trocknungsmedium)	132,00	133,00	863,00	927,00
Bandrockner (Luft als Trocknungsmedium)	132,00	133,00	863,00	927,00
Niedertemperaturbandrockner	95,00	100,00	843,00	1.000,00
Dünnschichttrockner	134,00	160,00	717,00	771,00
Scheibentrockner	64,00	66,00	876,00	876,00
Solare Trocknung	10,00	30,00	-	-
Trommeltrockner	85,00	87,00	800,00	865,00
Wirbelschichttrockner	68,00	99,00	820,00	880,00

## 10.16 Modul „Klärschlammnutzung“ – Inputparameter & Literaturwerte

Tabelle 10-36: Literaturwerte zu Berechnungsansätzen im Modul „Klärschlammnutzung“

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
<b>Energiebilanz Verbrennung</b>			
Verbrennungsluftverhältnis $\lambda$	1,50	-	[45]
Abgastemperatur $T_{AG}$	300,00	°C	Annahme nach [127, 142]
Aschetemperatur $T_A$	850,00	°C	[45]
Volllaststunden $t_{NSVerbrennung}$	8.760,00	ha <sup>-1</sup>	Annahme nach [11]
Elektrischer Eigenbedarf pro MW Brennstoffwärmeleistung exkl. ORC	37,5	kWhMW <sup>-1</sup>	Annahme nach Herstellerangaben
Elektrischer Eigenbedarf pro MW Brennstoffwärmeleistung inkl. ORC	75,0	kWhMW <sup>-1</sup>	
<b>Energiebilanz Vergaser</b>			
Elektrischer Eigenbedarf pro MW Brennstoffwärmeleistung	75,0	kWhMW <sup>-1</sup>	Annahme nach Herstellerangaben
Volllaststunden $t_{NSVergaser}$	8.760,00	ha <sup>-1</sup>	Annahme nach [11]

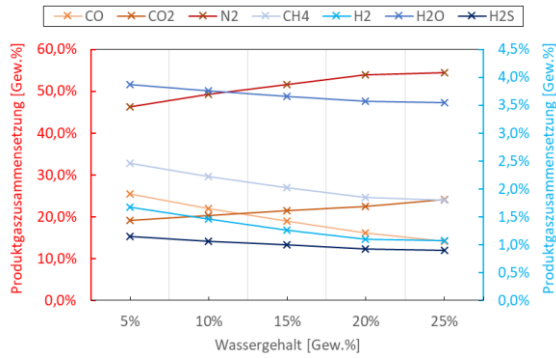
**Tabelle 10-37: Nutzerspezifisch definierbare Inputparameter des Moduls „Klärschlammnutzung“ inklusive deren Einfluss auf die Massen- (MB) und Energiebilanz (EB)**

Inputparameter	Einheit	Einfluss auf die	
		MB	EB
<b>Allgemein</b>			
Art des Verwertungsaggregates	-	X	X
NS-Trockensubstanz	gTSEW <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
Mittlere Klärschlammzusammensetzung (Asche-, C-, H-, N-, O- und S-Anteil)	Gew.% (trocken)	X	X
Mittlerer täglicher Faulgasvolumenstrom	Nm <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
Mittlerer täglicher Erdgasvolumenstrom	Nm <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
Volllaststunden	ha <sup>-1</sup>		X
Jährliche Aufbringung elektrische Energie	kWha <sup>-1</sup>		X
Jährliche Aufbringung thermische Energie	kWha <sup>-1</sup>		X
<b>Klärschlammvergasung</b>			
Art des Produktgas-Verwertungsaggregates	-	X	X
Kaltgaswirkungsgrad	%		X
Mittlerer täglicher Produktgasvolumenstrom	Nm <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
Mittlerer täglicher Faulgasvolumenstrom	Nm <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
Mittlerer täglicher Erdgasvolumenstrom	Nm <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	X	X
Volllaststunden	ha <sup>-1</sup>		X
Jährliche Aufbringung elektrische Energie	kWha <sup>-1</sup>		X
Jährliche Aufbringung thermische Energie	kWha <sup>-1</sup>		X
Elektrischer/Thermischer ORC-Wirkungsgrad	%		X

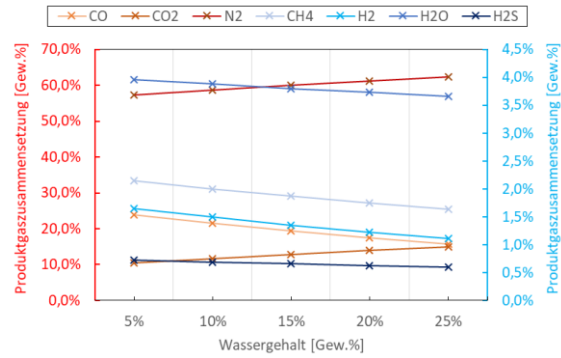
**Tabelle 10-38: Elektrischer und thermischer PG-BHKW-Wirkungsgrad nach elektrischer Nennleistung [17]**

BHKW-Leistung [kW <sub>el</sub> ]	min	max	Durchschnitt
<b>Elektrischer Wirkungsgrad [-]</b>			
<30	0,23	0,29	0,26
30-50	0,27	0,31	0,29
51-100	0,29	0,34	0,32
101-250	0,32	0,35	0,34
>250	0,33	0,39	0,36
<b>Thermischer Wirkungsgrad [-]</b>			
<30	0,53	0,60	0,57
30-50	0,48	0,59	0,53
51-100	0,35	0,50	0,43
101-250	0,36	0,48	0,42
>250	0,35	0,47	0,41

a)

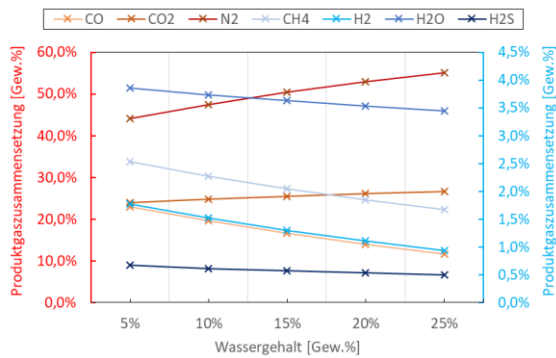


b)

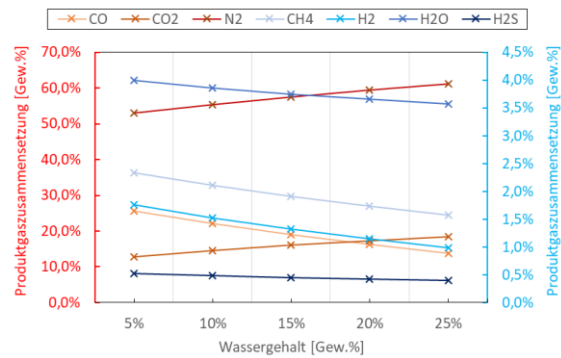


**Abbildung 10-1: Produktgaszusammensetzung der Schlammgruppen a) „Aerob - Gruppe 1“ und b) „Aerob - Gruppe 2“ gemäß Aspen Plus Simulationsmodell**  
 - Primärachse: CO-, CO<sub>2</sub>- und N<sub>2</sub>-Anteil; Sekundärachse: CH<sub>4</sub>-, N<sub>2</sub>-, H<sub>2</sub>O- und H<sub>2</sub>S-Anteil

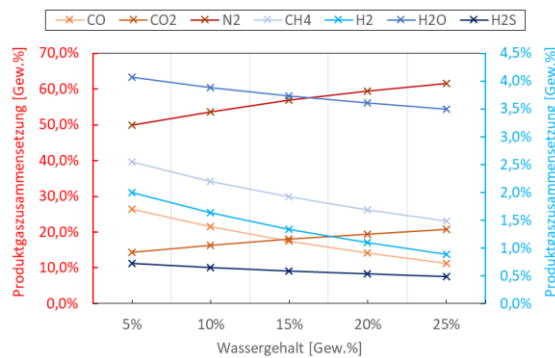
a)



b)

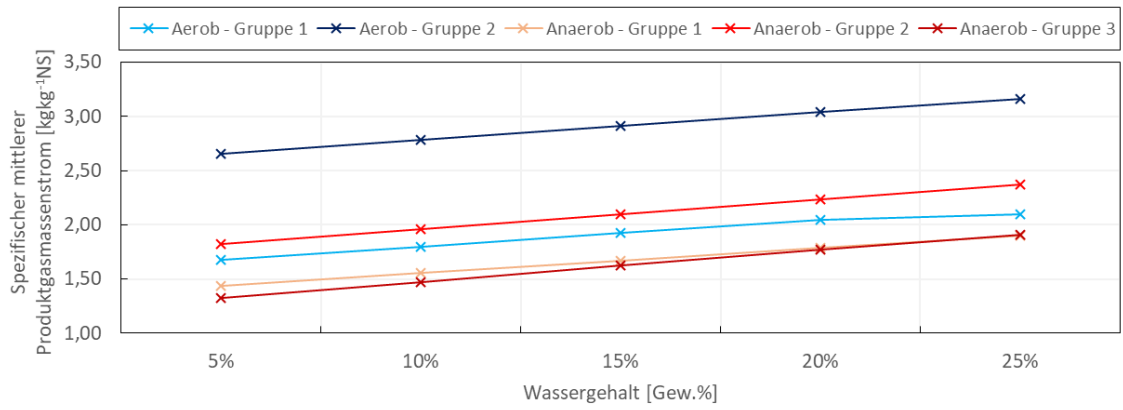


c)

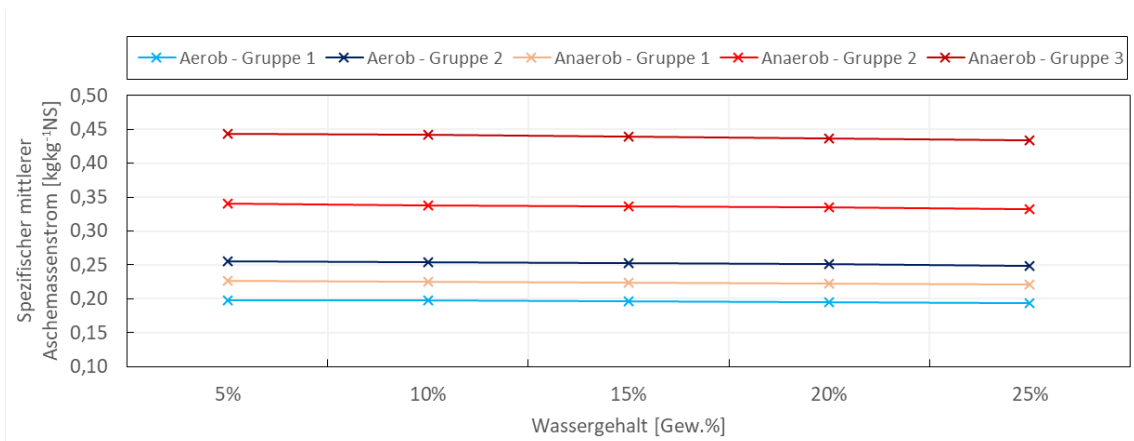


**Abbildung 10-2: Produktgaszusammensetzung der Schlammgruppen a) „Anaerob – Gruppe 1“, b) „Anaerob – Gruppe 2“ und c) „Anaerob – Gruppe 3“ gemäß Aspen Plus Simulationsmodell**  
 - Primärachse: CO-, CO<sub>2</sub>- und N<sub>2</sub>-Anteil; Sekundärachse: CH<sub>4</sub>-, N<sub>2</sub>-, H<sub>2</sub>O- und H<sub>2</sub>S-Anteil





**Abbildung 10-3: Spezifischer mittlerer Produktgasmassenstrom nach Schlammgruppen gemäß Aspen Plus Simulationsmodell**



**Abbildung 10-4: Spezifischer mittlerer Aschemassenstrom nach Schlammgruppen gemäß Aspen Plus Simulationsmodell**

## 10.17 Block „Modelltransformation“ – Inputparameter

**Tabelle 10-39: Optionen zur Nutzerspezifikation der Betriebszeiten energieintensiver Aggregate kommunaler ARAs**

Aggregat	Optionen zur Nutzerspezifikation					
	1	2	3	4	5	6
Zulaufpumpwerk	Dauerbetrieb	30 min On/30 min Off	45 min On/15 min Off	15 min On/45 min Off	-	-
Rechen inkl. Waschanlage	On: 8-10 und 14-16 Uhr	On: 6-8 und 16-18 Uhr	-	-	-	-
Sandfanggebläse	Dauerbetrieb konstant	-	-	-	-	-
Sandwaschanlage	On: 8-10 und 14-16 Uhr	On: 6-8 und 16-18 Uhr	-	-	-	-
Belüftung	Dauerbetrieb konstant	Dauerbetrieb nach CSB- Zulauf	Dauerbetrieb nach Zulauf- menge	-	-	-
Umwälzung, Rezirkulation, Rücklauf- schlammpumpe	Dauerbetrieb konstant	Dauerbetrieb nach CSB- Zulauf	Dauerbetrieb nach Zulauf- menge	30 min On/30 min Off	45 min On/15 min Off	15 min On/45 min Off
Eindicker	Dauerbetrieb	On: 6-18 Uhr	On: 18-6 Uhr	-	-	-
Entwässerung, Trockner	Dauerbetrieb	On: 8-16 Uhr	On: 16-0 Uhr	On: 0-8 Uhr	-	-
Energieversorgungs- einheit	Auslastung 100%	Auslastung 70%	Auslastung 50%	Auslastung 30%	Auslastung 0%	-

## 10.18 Analyse 3 und 4 – Detailinformationen

**Tabelle 10-40: Anteil der Zellen 2 – 6 am städtischen Elektrizitätsbedarf und an der städtischen elektrischen Residuallast [139]**

Zelle	2	3	4	5	6	Gesamt
Anteil	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Elektrizitätsbedarf	2.41	1.28	4.13	1.33	2.61	11.77
Residuallast	2.50	1.53	4.39	1.45	2.54	12.12

**Tabelle 10-41: Struktur der Zellen 2 – 6 nach Standardlastprofilen [139]**

Standardlastprofil	Anteil des Standardlastprofiles der Zellen				
	2	3	4	5	6
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
H0	55.27	63.60	40.66	49.28	0.00
G0	8.61	14.45	9.40	10.32	1.55
G1	2.81	3.98	1.92	2.99	0.47
G2	0.44	0.00	1.69	0.00	0.00
G3	0.00	0.37	2.42	0.00	0.00
G4	0.35	0.00	1.48	0.00	0.00
G6	0.26	0.00	1.27	0.88	0.00
L0	0.44	0.00	0.46	0.00	0.00
ULA	13.34	1.51	6.90	4.93	0.00
ULB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ULC	0.00	0.00	0.01	0.08	0.00
ULD	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
ULF	1.88	1.74	0.39	2.19	0.24
B1	0.77	1.97	0.91	0.97	0.00
HF	7.29	2.70	21.24	28.05	0.00
G7	0.60	1.05	0.68	0.00	0.45
LPZ	7.54	8.05	10.10	0.00	97.24