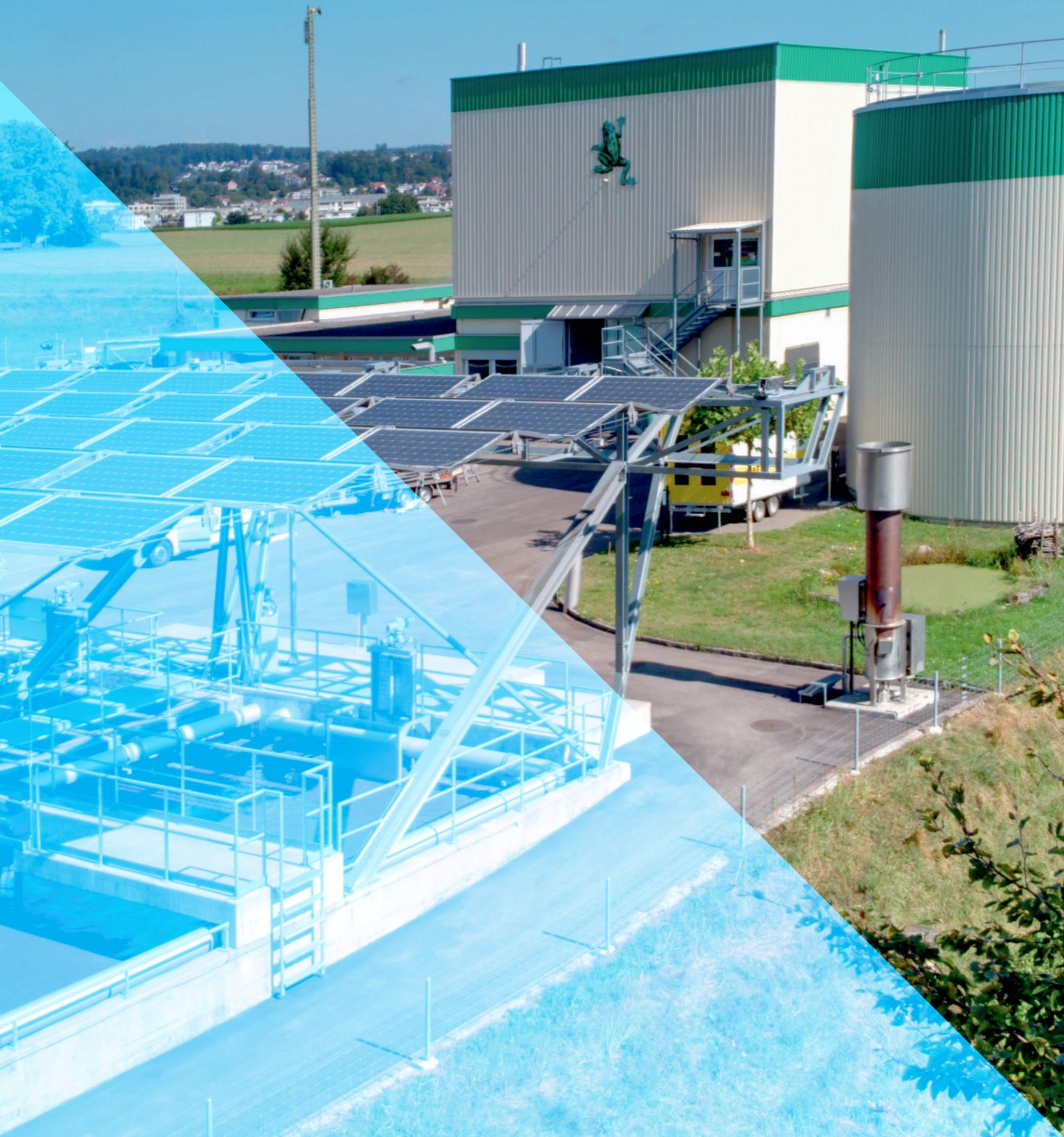




Kanton Zürich
Baudirektion
AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft

Energieeffizienz auf Zürcher ARA

Stand 2020





Impressum

Herausgeber:

Kanton Zürich, Baudirektion
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
Abteilung Gewässerschutz
www.ara.zh.ch

Autor/Autorinnen AWEL:

Benjamin Rist
Dr. Sarina Schielke
Dr. Edith Durisch-Kaiser

Fachliche Begleitung INFRAconcept AG:

Dr. Stefan Binggeli
Dr. Bernd Kobler

Folgenden Personen danken wir für Ihre Unterstützung:

Alex Nietlisbach, AWEL
Silas Gerber, AWEL
Ernst A. Müller, InfraWatt
Gian Levy, HOLINGER AG

Gestaltung:

Roland Ryser, zeichenfabrik.ch

Bilder:

Benjamin Rist
ERZ Entsorgung + Recycling Zürich
Biogas Zürich AG
Roger Müller

Zusammenfassung

In Anlehnung an die Neuerungen zum kantonalen Energiegesetz hat die Sektion Abwasserreinigungsanlagen (ARA) des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) eine Massnahmenplanung zu den Zürcher ARA an die Hand genommen. Als Grundlage dazu wurde der aktuelle Stand der Energieeffizienz auf den ARA mit mehr als 1 000 angeschlossenen Einwohnerinnen und Einwohnern ausgewertet. Damit sind die Daten von insgesamt 60 ARA in diese Erhebung eingeflossen. Es wurden die gängigen Energiekennwerte für jede ARA bestimmt und der Gesamtenergiefluss (Summe aller Zürcher ARA) berechnet. Die Energiekennwerte decken grundsätzlich die beiden Bereiche «Strom» und «Wärme» ab. Die Bestandsaufnahme erlaubt zusätzlich auch eine Abschätzung des Optimierungspotenzials in beiden Bereichen.

Aktuell liegt die Eigenversorgung von Zürcher ARA mit Strom gesamthaft bei 33 %. Das Niveau der gesamtkantonalen Eigenversorgung ist jedoch stark von der Anzahl Grossanlagen, die ihr Klärgas aufbereiten statt verstromen, abhängig. Durch eine verbesserte Stromeffizienz, höhere Wirkungsgrade bei den Blockheizkraftwerken (BHKW) und einer Verminderung des Klärgasverbrauchs für Heizung und Abfackelung, könnte die elektrische Eigenversorgung bis auf 47 % erhöht werden. Mit Fotovoltaik könnte beispielsweise die lokale Stromproduktion und damit der Eigenversorgungsgrad noch weiter gesteigert werden.

Die Berechnung der Eigenversorgung mit Wärme ist mit den vorhandenen Daten nicht möglich, jedoch verwenden über die Hälfte der betrachteten ARA noch fossile Brennstoffe zur Deckung ihrer saisonalen Wärmedefizite. Die Analyse zeigt, dass die im gereinigten Abwasser enthaltene Wärme das grösste Energiepotenzial besitzt und eine vollständig erneuerbare Wärmeversorgung auf ARA ermöglichen würde.

Diese Studie hat gezeigt, dass es verschiedene Möglichkeiten gibt, um die Energieeffizienz der Zürcher ARA zukünftig zu steigern. Auf Basis dieser Erkenntnisse kann nun die Massnahmenplanung zur Steigerung der Energieeffizienz der Zürcher ARA erarbeitet werden. Unabhängig davon sollten innovative Konzepte zur Förderung von Solarenergie und zur Nutzung der Abwasserwärme entwickelt werden. Insbesondere das bisher ungenutzte Potenzial der Abwasserwärme könnte einen wichtigen Beitrag zur Energiegewende leisten.

Inhalt

Ausgangslage	5
Projektziel	5
Rechtsgrundlagen	5
Methodik	6
Berechnete Energiekennwerte	6
Grössenklassen	6
Vergleichswerte	6
Berechnung Gesamtenergiefluss	6
Stromverbrauch	7
Aufteilung nach Grössenklassen	7
Spezifischer Gesamtstromverbrauch	8
Spezifischer Stromverbrauch der Biologie	9
Eigenversorgungsgrad Elektrizität	10
Klärgasproduktion und -verwertung	11
Spezifische Klärgasproduktion	11
Abfackelung von Klärgas	11
Energetische Verwertung von Klärgas	12
Verstromung von Klärgas	12
Kantonaler Gesamtenergiefluss 2020	14
Schlussfolgerungen	16
Strom	16
Wärme	17
Zusammenschlüsse von ARA	17
Klima	17
Weitere Empfehlungen	17
Massnahmenvorschläge	18
Literaturverzeichnis	19
Anhang	21
A – Parameter	22
B – Formeln	22
C – Belastung und Strom 2011	23
D – Kantonaler Gesamtenergiefluss 2020	24
E – Zusammenfassung der Energiekennwerte	25

Ausgangslage

Aktuell sind im Kanton Zürich 60 ARA mit mehr als 1000 angeschlossenen Einwohnerinnen und Einwohnern in Betrieb. Zur Reinigung des anfallenden Abwassers wird Strom und Wärme eingesetzt. Der gesamte Strombedarf belief sich im Jahr 2020 auf 76 GWh, was rund 1 % des kantonalen Endstromverbrauchs entspricht [1]. Zur Deckung des Wärmebedarfs wird in der Regel die Abwärme der BHKW eingesetzt. Über die Hälfte der ARA nutzen jedoch noch Heizöl und Erdgas als Energieträger. Im Jahr 2020 wurden so insgesamt 2.5 GWh Wärme zugeführt, gleichzusetzen mit 250 000 m³ Erdgas oder knapp einem Promille des Erdgas- und Heizölverbrauchs der Stadt Zürich [2].

Im Vergleich zum Strom- und Wärmeverbrauch für die Abwasserreinigung führt das Abwasser an sich bereits deutlich grössere Energiemengen in chemischer und thermischer Form mit sich. In der Schlammfäulung wird ein Teil der chemisch gespeicherten Energie in energiereiches Klärgas umgewandelt. Die Fäulung besitzt deshalb eine energetische Schlüsselrolle. Im Kanton Zürich wird praktisch der gesamte Klärschlamm auf 51 Schlammfäulungsanlagen ausgefäult. Im Jahre 2020 resultierte daraus eine Produktion von knapp 23 Mio. m³ Klärgas. Unter Verwendung des Heizwerts von Klärgas entspricht dies einem Energiegehalt von 145 GWh. Noch beträchtlicher ist jedoch der Energiegehalt, der dem Abwasser mittels Wärmepumpen entzogen werden könnte. Der Energieplanungsbericht 2017 des Kantons Zürich geht von einem theoretischen Abwasserwärmenutzungspotenzial von 670 GWh¹ aus [3].

Für die Beurteilung der Eigenversorgung mit Wärme fehlen aktuell noch die nötigen Messungen. Es kommen aber bereits 26 der 60 Zürcher ARA ohne fossile Brennstoffe aus und können in diesem Zusammenhang als autark angesehen werden. Die Bereitstellung von Energie in Form von Strom, Heizöl und Erdgas bedarf rund 13 % der jährlichen Betriebskosten (exkl. Kapitalkosten). Umgelegt auf die Einwohnerzahl führt dies zu Ausgaben für Energie von durchschnittlich 6.30 CHF pro Einwohner/in und Jahr (Daten Zürcher ARA 2020).

Fasst man diese Grundlagen zusammen, so erstaunt es nicht, dass ARA zunehmend energieautark betrieben werden können. Dabei reicht im Mittel die Energie im zufließenden Abwasser aus, um die Strom- und Wärmeversorgung einer ARA vollständig abzudecken. Durch eine verbesserte Energieproduktion, in Kombination mit Energieeinsparungen, könnten zukünftig auch die jährlich anfallenden Energiekosten pro Einwohnerin und Einwohner noch weiter reduziert werden.

Projektziel

Das Ziel dieser Erhebung ist, mittels einer umfassenden Kennwerterhebung die Grundlage für eine Massnahmenplanung zur Steigerung der Energieeffizienz auf den Zürcher ARA zu schaffen. Zu diesem Zweck wurden sieben etablierte Energiekennwerten für das Jahr 2020 zusammengestellt und daraus die elektrischen, chemischen und thermischen Energieflüsse sämtlicher Zürcher ARA abgeleitet.

Rechtsgrundlagen

Der Auftrag zur Optimierung der Energieflüsse auf ARA leitet sich aus dem Bundesgesetz (Gewässerschutzverordnung, GSchV) und den kantonalen Vorgaben (neues Energiegesetz Zürich, EnerG ZH) ab. Die Vollzugshilfe des Bundesamts für Umwelt (BAFU) konkretisiert die Forderung nach einem «fachgerechten Betrieb» (Art. 13 GSchV) mit Bezug auf den Energieverbrauch und die Energiegewinnung [4]. Gleichzeitig strebt auch der Kanton Zürich für seine Kläranlagen einen effizienten und sparsamen Umgang mit Energie an (§ 1 EnerG ZH).

Laut neuem EnerG ZH müssen zukünftig alle Vorhaben zum Ersatz eines Wärmeerzeugers mit fossilen Brennstoffen vertieft betrachtet werden. Dabei ist zu beachten, dass Lebenszykluskosten um maximal 5 % höher ausfallen dürfen, um einen Ersatz durch eine erneuerbare Energiequelle zu rechtfertigen. Für Wärmeerzeuger, die zu über 50 % für die Erzeugung von Prozesswärme mit Temperaturen von mehr als 60 °C eingesetzt werden und eine Abtrennung des Prozesswärmeverteilnetzes vom Heizungsverteilnetz nicht möglich ist, gilt diese Vorschrift jedoch nicht [5].

Die Hälfte der in dieser Studie betrachteten 60 ARA beziehen mehr als 0.5 GWh Strom vom Netz. Dadurch fallen diese Anlagen in die Klasse der Grossverbraucher. Gemäss § 13 a EnerG ZH sind Grossverbraucher grundsätzlich verpflichtet, individuell oder im Konsortium mit anderen Verbrauchern, verhältnismässige Energieoptimierungen umzusetzen.

Eine weitere wichtige Rechtsgrundlage im Kanton Zürich ist der kantonale Klärschlamm-Entsorgungsplan 2015 [6]. Sämtlicher Zürcher Klärschlamm wird seit 2015 in stabilisiertem und entwässertem Zustand auf der Klärschlammverwertungsanlage Werdhölzli zentral der Verbrennung zugeführt.

¹ Annahme: Entzug von 5 °C aus 46 % der mittleren jährlich anfallenden Abwassermenge im Kanton Zürich

Methodik

Berechnete Energiekennwerte

Um den aktuellen Stand der Energieeffizienz auf Zürcher ARA zu quantifizieren, wurden sieben Energiekennwerte nach dem Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA) [7] und der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) [8] bestimmt (Tabelle 1). Auf die Berechnung des spezifischen Stromverbrauchs der Pumpwerke, den Eigenversorgungsgrad mit Wärme und den spezifischen externen Wärmebezug wurde aufgrund der fehlenden Datengrundlagen oder der geringen Aussagekraft verzichtet. Als Betrachtungszeitraum wurde das Jahr 2020 gewählt.

Da nicht alle ARA über dieselben Verfahrensstufen verfügen, lassen sich nur drei Kennwerte (e_{ges} , e_{BB} , V_e) konsistent für alle 60 ARA berechnen. Faulungen sind auf 50 der 60 ARA vorzufinden. Ergänzt wird diese Zahl durch die zentrale Schlammbehandlungsanlage Pfannenstiel (ZSA). Folglich befinden sich 51 Klärschlammfaulungen (e_{KG} , N_1 , N_3) im Kanton Zürich. Von den 51 Klärgasproduzenten betreiben wiederum 45 ein BHKW (N_2).

Grössenklassen

Die resultierenden Kennwerte wurden klassenweise zusammengefasst. Dabei wurde eine Einteilung in drei Grössenklassen (GK) gewählt, basierend auf der mittleren Belastung 2020 (EW_{CSB}). GK 1 umfasst 25 kleinere Anlagen bis 10 000 EW_{CSB} und GK 2 umfasst 32 Anlagen von 10 000 bis 100 000 EW_{CSB} . Die restlichen drei ARA liegen bei über 100 000 EW_{CSB} . Da nicht alle ARA über dieselben Verfahrensstufen verfügen und Daten teilweise fehlten, weisen diverse Kennwerte eine tiefere Anzahl ARA pro Grössenklasse auf.

Vergleichswerte

Um die berechneten Energiekennwerte einordnen zu können, wurde ein Vergleich mit älteren, gesamtschweizerischen Daten [9] und mit Richt- und Idealwerten des VSA angestellt [10]. Bei der Auswertung des spezifischen Gesamtstromverbrauchs von Zürcher ARA wurden jedoch keine Zuschläge oder Abzüge (Korrekturfaktoren) für Hebewerke, zusätzliche Reinigungsstufen (Filtration, EMV) oder seltene Verfahren (Wirbelbett, Festbett und Membrananlagen) angewendet.

Berechnung Gesamtenergiefluss

Um das Gesamtsystem «Abwasserreinigungsanlagen Kanton Zürich» und fehlende Daten im Bereich der Wärmeflüsse ebenfalls zu beleuchten, wurde ein Gesamtenergiefluss abgeleitet. Ziel ist, sich von der anlagenspezifischen Sichtweise der Energiekennwerte zu lösen und stattdessen aus kantonaler Perspektive Schwerpunkte zu setzen. Dazu wurden die Daten der einzelnen Zürcher ARA aufsummiert. Fehlende Daten wurden anhand der Mittelwerte anderer ARA derselben Grössenklasse interpoliert. Der Gesamtenergiefluss enthält auch Abschätzungen weiterer Flüsse, über die systematisch keine Zahlen erfasst werden. Dies betrifft sämtliche Wärmeflüsse mit Ausnahme der Zufuhr von Heizöl und Erdgas. Die Rohdaten, die die Grundlage des kantonalen Gesamtenergieflusses bilden, finden sich im Anhang D.

Tabelle 1: Zusammenstellung der betrachteten Energiekennwerte. Die Spalte «Datenlage» enthält eine Einschätzung der Datenqualität (mittel, gut, sehr gut) sowie der Datenverfügbarkeit (%). Nach Möglichkeit wird die Notation des VSA für die Kennzahlen verwendet [11]. Eine Übersicht der verwendeten Parameter befindet sich im Anhang A, Erläuterungen zu den Einflussgrössen im Anhang B.

Bezeichnung	Formel	Einheit	Datenlage
Spezifischer Gesamtstromverbrauch	$e_{ges} = \frac{\text{Strom}_{\text{Verbrauch}}}{EW_{CSB, 120}}$	kWh / $EW \cdot a$	sehr gut (100 %)
Spezifischer Stromverbrauch der gesamten biologischen Behandlung	$e_{BB} = \frac{\text{Strom}_{\text{gesamte Biologie}}}{EW_{CSB, 120}}$	kWh / $EW \cdot a$	mittel (70 %)
Eigenversorgungsgrad Elektrizität	$V_e = \frac{\text{Strom}_{\text{BHKW}} + \text{Strom}_{\text{sonstige Produktion}}}{EW_{CSB, 120}}$	%	gut (100 %)
Spezifische Klärgasproduktion (EW^1)	$e_{KG} = \frac{\text{Klärgas}_{\text{Produktion}}}{EW_{CSB, 120}}$	$l / EW \cdot d$	mittel (98 %)
Spezifische Klärgasproduktion (oTS^2)	$N_3 = \frac{\text{Klärgas}_{\text{Produktion}}}{F_{\text{Zulauf Faulung (oTS)}}$	l / kg_{oTS}	mittel (90 %)
Grad der gesamten Klärgasnutzung	$N_1 = 1 - \frac{\text{Klärgas}_{\text{Abfackelung}}}{\text{Klärgas}_{\text{Produktion}}}$	%	mittel (96 %)
Klärgasumwandlung in Elektrizität	$N_2 = \frac{\text{Strom}_{\text{BHKW}}}{\text{Klärgas}_{\text{Produktion}} \cdot g_{CH_4} \cdot H_{i, \text{Erdgas}}}$	%	mittel (96 %)

Stromverbrauch

Aufteilung nach Grössenklassen

Der Stromverbrauch und die mittlere Belastung der drei Grössenklassen sind in Abbildung 1 dargestellt. Die drei Anlagen, welche in die Kategorie ARA > 100 000 EW_{CSB} fallen, benötigen 43 % des Gesamtstromverbrauchs, fünf Prozent weniger als sie anteilmässig an Belastung bewältigen. Folglich ist von einer besseren Energieeffizienz auszugehen, da mit weniger Strom ein grösserer Beitrag geleistet wird. Mit zunehmender Grösse steigt ebenfalls die gewichtete Auslastung je Grössenklasse. Diese Erkenntnis deckt sich mit schweizweiten Daten [12]. Die Anlagengrösse und die Auslastung wurden auch in der Literatur als einflussreichste Faktoren für den Stromverbrauch erkannt [13].

Der Verlauf des kantonalen Gesamtstromverbrauchs (alle ARA) über die letzten 20 Jahre zeigt, dass dieser praktisch auf konstantem Niveau geblieben ist, obwohl zeitgleich ein deutlicher Zuwachs der Belastung stattgefunden hat [14]. Vergleicht man beispielsweise Daten der Jahre 2011 und 2020, so hat die Belastung um ein Drittel zugenommen, währenddem der Stromverbrauch lediglich um 7 % angestiegen ist. Zeitgleich kam es zu einer Verschiebung der Abwasserbehandlung hin zu grösseren und besser ausgelasteten ARA (siehe Anhang C).



Die Belüftung der Biologie gilt als grösster Stromverbraucher. Fortgeschrittene Steuerungsansätze, wie beispielsweise das A/I-Verfahren, vermögen den Stromverbrauch der Biologie zu senken.

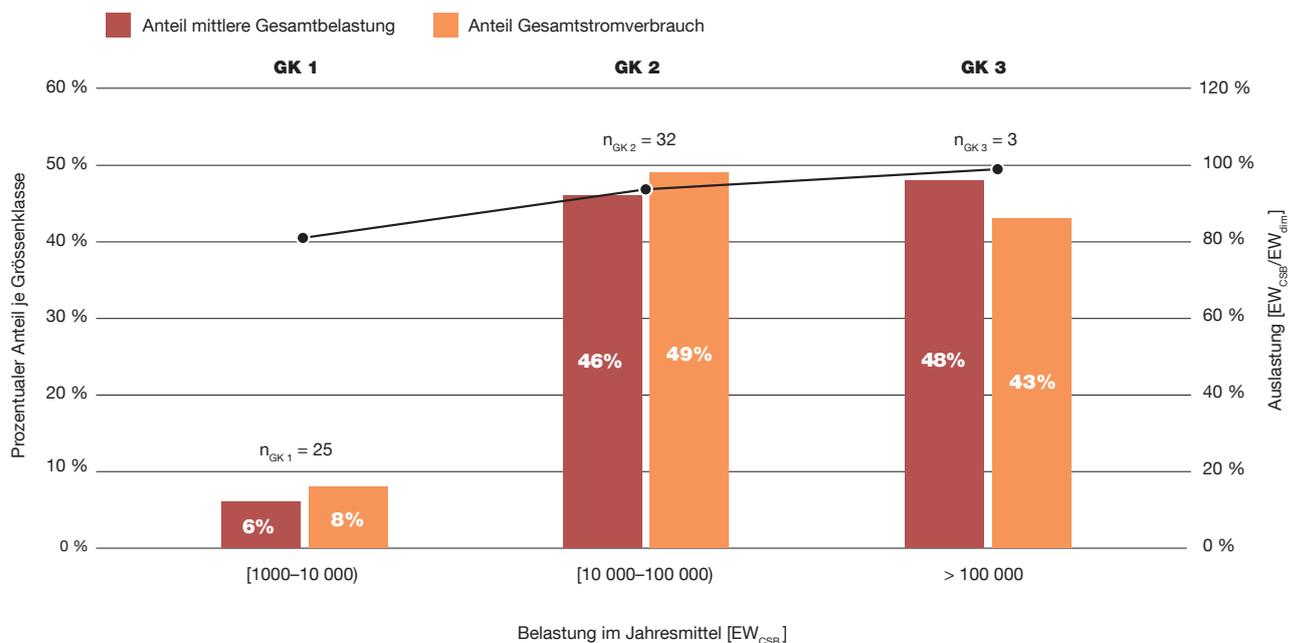


Abbildung 1: Relation zwischen dem Gesamtstromverbrauch und der Belastung im Jahresmittel. Zusätzlich ist auf der Sekundärachse die gewichtete Auslastung pro Grössenklasse dargestellt. Aus der Abbildung kann eine zunehmende Energieeffizienz und Auslastung mit steigender Belastung abgelesen werden.

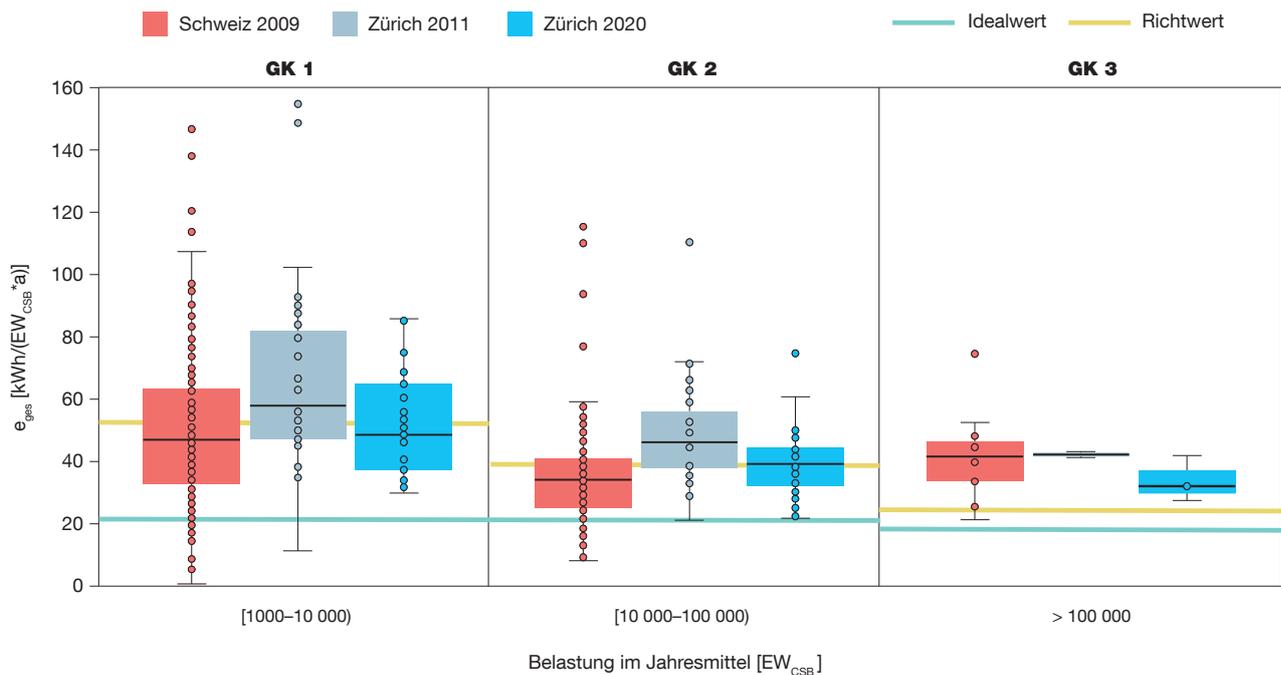


Abbildung 2: Spezifischer Gesamtstromverbrauch (e_{ges}) der Daten CH 2009, ZH 2011 und ZH 2020. Die Achse wurde für die Daten ZH 2020 optimiert, weshalb gewisse Ausreisser der restlichen Schweiz nicht ersichtlich sind. Die grüne Linie stellt den Idealwert dar, die gelbe den Richtwert über die entsprechende Grössenklasse.

Datenumfang: $n_{GK1} = 189/35/25$, $n_{GK2} = 136/27/32$, $n_{GK3} = 11/2/3$ (CH 2009/ZH 2011/ZH 2020)

Spezifischer Gesamtstromverbrauch

Die spezifischen Gesamtstromverbräuche innerhalb der jeweiligen Grössenklasse sind in Abbildung 2 dargestellt. Eingesetzt wurden Daten aus dem Jahr 2009 für Schweizer Anlagen (ohne ZH) im Vergleich zu den Daten der Zürcher Anlagen für die Jahre 2011 und 2020. Bereits in Abbildung 1 ist zu erkennen, dass der spezifische Strombedarf mit steigender Belastung, respektive Anlagengrösse, sinkt. Dieser Trend zeichnet sich umso deutlicher in Abbildung 2 ab. Mit steigender Belastung nimmt in der ersten und zweiten Grössenklasse der Median ab, wohingegen sich dieser Trend in Kategorie 3 nur für den Kanton Zürich fortsetzt.

Innerhalb von knapp zehn Jahren hat sich die Verteilung im Kanton Zürich in sämtlichen Grössenklassen verbessert, sprich nach unten verschoben. Der mittlere spezifische Gesamtstromverbrauch sank somit in neun Jahren um 20 % von 47 auf 37 $\text{kWh}/\text{EW} \cdot \text{a}$ (siehe Tabelle 4, Anhang C).

Um neben den relativen Vergleichen der drei Datensätze auch einen absoluten Anhaltspunkt im Hinblick auf eine Potenzialabschätzung zu erhalten, wurden die Ideal- und Richtwerte herangezogen (grüne und gelbe Linie). Ungefähr die Hälfte der Zürcher ARA in der Grössenklasse 1 und 2 erreichen im Jahr 2020 die Richtwerte. Jedoch vermag keine der drei Grossanlagen (GK 3) die Richtwerte einzuhalten. Die Idealwerte werden von keiner Zürcher ARA erreicht. Dies ist insofern problematisch, als dass die grössten Kläranlagen allein für rund die Hälfte des kantonalen Strombedarfs verantwortlich sind. Die Annahme, dass die Ideal- und Richtwerte in Zukunft er-

reicht werden, resultiert vermutlich in einem zu optimistischen Potenzial. Selbst bei der ARA Zürich-Werdhölzli, der grössten Schweizer Kläranlage, die den Forderungen des Grossverbrauchermodells konsequent nachkommt und einer aktiven Energieoptimierung nachgeht, liegt der spezifische Strombedarf deutlich über dem Richtwert.

Das Ausmass der Diskrepanz zu den Richt- und Idealwerten hängt auch damit zusammen, dass für die Berechnung der Energiekennwerte keine Korrekturfaktoren (Hebwerke, zusätzliche Reinigungsstufen und seltene Verfahren) verwendet wurden. Gemäss den Erfahrungen fachkundiger Personen sind jedoch weitere Einflüsse, wie beispielsweise eine ungünstige Lage oder grosse Reserven, ausschlaggebend für die Energieeffizienz einer ARA [15].

Ein Bezug auf die Richt- und Idealwerte ist deshalb nur bedingt sinnvoll. Alternativ bietet sich ein Bezug auf die anlagenspezifischen Zielwerte an. Diese beziehen die standortbedingten und leistungstechnischen Anforderungen mit ein und funktionieren nach dem «bottom-up»-Prinzip. Ausgehend von den einzelnen Pumpen und sonstigen Aggregaten wird ein Richt- und Idealwert für die gesamte Anlage ermittelt. Dies erfordert jedoch eine deutlich systematischere Auswertung, wie beispielsweise im Rahmen einer energetischen Feinanalyse [16] oder dem deutschen Pendant, der Energieanalyse [8]. Geht man davon aus, dass sämtliche Zürcher ARA in Zukunft nicht den Richtwert, sondern den aktuellen Medianwert innerhalb ihrer Grössenklasse erreichen, besteht ein Einsparpotenzial von 7 %.

Spezifischer Stromverbrauch der Biologie

Obwohl eine Kläranlage je nach Grösse und Anforderungen unterschiedlich aufgebaut ist, stellt die biologische Stufe die grösste Stromverbrauchergruppe dar. Für die 42 ausgewerteten Anlagen liegt der Anteil der biologischen Behandlung am Gesamtstromverbrauch im Mittel bei 57 %.

In Abbildung 3 ist der spezifische Stromverbrauch der Verbrauchsgruppe «Biologische Reinigung und Nachklärung» abgebildet. Fast alle Werte liegen im Bereich zwischen den Ideal- und Richtwerten. Ein aktuelles Beispiel zeigt, dass mit einer Kombination aus fortgeschrittener Belüftungstechnik (Turboverdichter, Luftmengenmessungen und zonenweiser Belüftung) und dynamischer Regelung sogar der Idealwert unterschritten werden kann (11.4 kWh/EW*a) [17]. Offensichtlich sind die Richt- und Idealwerte nicht mehr aktuell und sollten überarbeitet werden.

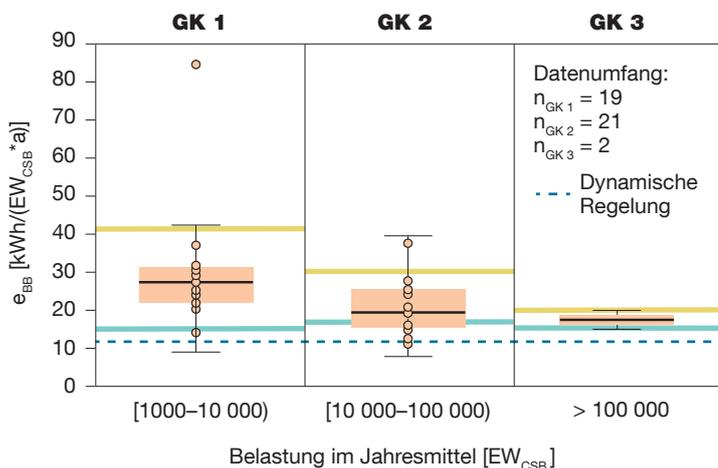


Abbildung 3: Spezifischer Stromverbrauch der gesamten Biologie (e_{BB}). Die grüne Linie stellt den Idealwert dar, die gelbe den Richtwert über die entsprechende Grössenklasse. Zusätzlich ist der Strombedarf der ersten dynamisch regulierten Schweizer ARA eingezeichnet [17].

Lediglich vier Anlagen in den Grössenklassen 1 und 2 erfüllen die Richtwerte nicht. Der höchste Stromverbrauch in der GK 1 bezieht sich auf eine Anlage mit aerober Schlammstabilisierung. In dieser Anlage wird der Energiegehalt im Schlamm, der sonst in der Faulung genutzt werden kann, unter Einsatz von zusätzlich eingeblasener Luft veratmet. Dies führt verfahrensbedingt zu einem grösseren spezifischen Stromverbrauch.

Die Daten der Zürcher ARA erlauben eine detailliertere Auswertung der Verbrauchsgruppe «Biologische Reinigung und Nachklärung». So machen die Gebläse der biologischen Reinigungsstufe mehr als 2/3 des Strombedarfs aus. Der Rest entfällt auf weitere Verbraucher, wie beispielsweise Rührwerke und Rücklaufförderpumpen.

Abbildung 4 dient als Hilfestellung, um eine grobe Einordnung der Relevanz der weiteren Verbrauchsgruppen in Bezug auf deren Stromverbrauch zu erhalten, insbesondere im Hinblick auf die Elimination von Mikroverunreinigungen. Dabei sind links Angaben des VSA vor Einführung der Elimination von Mikroverunreinigungen zu finden und rechts die aktuelle Auswertung der ARA Zürich-Werdhölzli, welche bereits eine Ozonung zur Elimination von Mikroverunreinigungen betreibt. Es zeigt sich, dass die Ozonung mit 20 % eine bedeutende zukünftige Verbrauchsgruppe darstellt. Je nach gewähltem Verfahren wird ein Bereich von 5 bis 25 % prognostiziert [18].

Abbildung 4 gibt einen guten Überblick über die typische Verteilung der verschiedenen Verbrauchsgruppen. Im Einzelfall sollten aber standortspezifische Gegebenheiten berücksichtigt werden. So kann beispielsweise der Anteil der Abwasserhebwerke zwischen 5 und 12 % variieren [19].

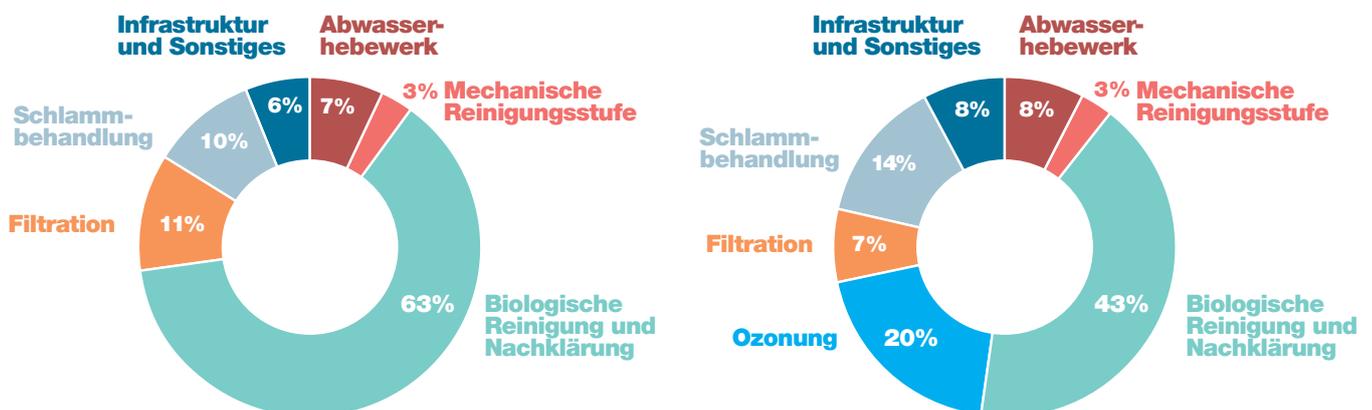


Abbildung 4: Aufteilung des Strombedarfs auf sechs resp. sieben Verbrauchsgruppen. Als Grundlage dient die Modellanlage aus «Energie in ARA» mit einer mittleren Belastung von 100 000 EW [10] sowie Daten der ARA Zürich-Werdhölzli für das Jahr 2020.

Eigenversorgungsgrad Elektrizität

Der Eigenversorgungsgrad ist abhängig vom Stromverbrauch und der Eigenstromproduktion über BHKW oder andere Quellen. Ob der produzierte Strom verkauft und ins Netz eingespeist wird oder direkt auf der ARA verbraucht wird, spielt für die Betrachtung des Eigenversorgungsgrads keine Rolle.

Drei der 60 Zürcher ARA erreichen bereits einen elektrischen Eigenversorgungsgrad von über 70 % (Abbildung 5). 15 Anlagen weisen Werte unter 5 % auf. Bis auf zwei Anlagen liegt dies jedoch daran, dass entweder keine Faulung vorhanden ist oder das Klärgas aufbereitet und ins Erdgasnetz eingespeist wird. Dadurch sinkt zwar der Eigenversorgungsgrad, gleichzeitig wird jedoch Biogas produziert, das Erdgas fossilen Ursprungs ersetzt.

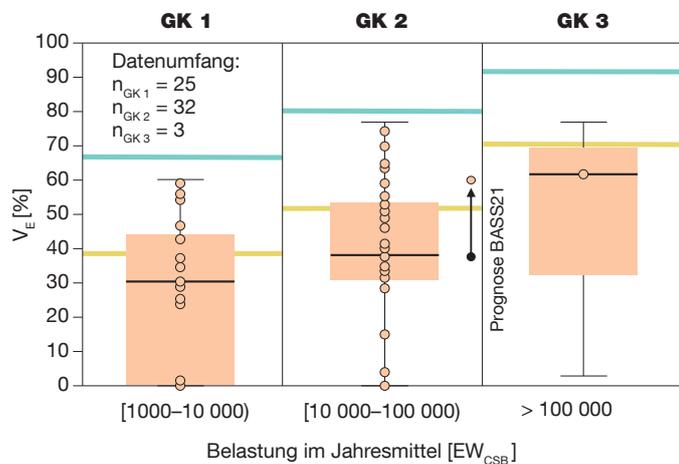


Abbildung 5: Eigenversorgungsgrad Elektrizität (V_E). Neben den Richt- und Idealwerten (gelbe bzw. grüne Linie) ist zudem der prognostizierte Anstieg der elektrischen Eigenversorgung der ARA Bassersdorf durch das neu installierte Solarfaltdach dargestellt.

Unter der Annahme, dass die Gewinnung von Strom mittels Solaranlagen konsequent erfasst wurde, besitzen neun ARA Solarzellen. Die ARA Bassersdorf hat im Herbst 2020 als erste Zürcher ARA ein Solarfaltdach in Betrieb genommen. Dadurch wird es möglich, einen grossen Flächenanteil über den Becken der ARA zu nutzen und einen substanziellen Anteil des Strombedarfs der Anlage abzudecken. Es wird mit einer Verbesserung des Eigenversorgungsgrads von bisher 38 % auf über 60 % gerechnet [20]. Dieses Beispiel verdeutlicht das Potenzial der Fotovoltaik für die Steigerung der Eigenversorgung einer ARA.



Die ARA als Energielieferant. Der Strombedarf der Biologie und der Ozonung kann auf der ARA Bassersdorf mittels Solarfaltdach und Klärgasverstromung kompensiert werden.

Klärgasproduktion und -verwertung

Spezifische Klärgasproduktion

Von den 60 Zürcher ARA besitzen 50 eine anaerob-mesophile Faulung. Bis auf eine Anlage geben die übrigen 10 Anlagen ihren Schlamm entweder an eine grössere ARA, oder an die ZSA zur Faulung ab. In Abbildung 6 ist die Klärgasproduktion bezogen auf die zugeführte organische Trockensubstanz (N_3) ersichtlich. Mit zunehmender Grössenklasse steigt der Median leicht von 550 (GK 1) bis 580 l/kg_{oTS} (GK 3) an. Die spezifische Klärgasproduktion, bezogen auf die mittlere jährliche Belastung (e_{KG}), bewegt sich zwischen 30 und 35 $\text{l/EW}^*\text{d}$ und ist nicht von der Grössenklasse abhängig, was auch für deutsche Anlagen nachgewiesen wurde [21].



Die Faulung ist für die Energiebilanz einer ARA von zentraler Bedeutung: Aus Klärschlamm kann so Klärgas gewonnen werden. Auf dem Bild ist neben dem Faulturm ebenfalls die Fackel der ARA Basserdorf ersichtlich.

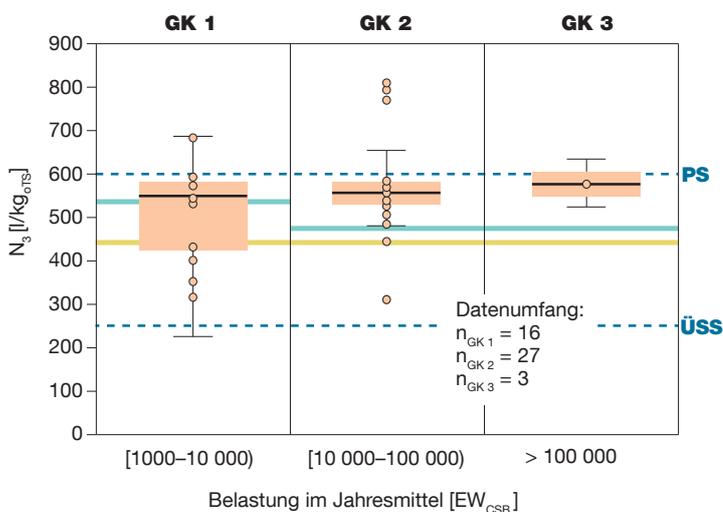


Abbildung 6: Spezifische Klärgasproduktion pro oTS (N_3). Neben den Richt- und Idealwerten (gelbe bzw. grüne Linie) ist ebenfalls die obere Gasausbeute von Primärschlamm (PS) und die untere Gasausbeute von Überschussschlamm (ÜSS) ersichtlich [22].

Die Mehrheit der Anlagen übertrifft den Idealwert und nur wenige Anlagen erfüllen ihn nicht. Da aktuell lediglich zwei Zürcher Anlagen in sehr bescheidenem Umfang Co-Vergärung betreiben, ist dies nicht der Grund für die relativ hohe Ausbeute. Die Gasausbeute von Zürcher Klärschlamm liegt im Bereich der Literaturwerte für Primärschlamm ($600 \text{ l/kg}_{\text{oTS}}$) [22]. Da die Gasausbeute mit den organischen Inhaltsstoffen des Schlammes zusammenhängt [23], drängt sich zusätzlich die Vermutung auf, dass sich die Zusammensetzung des Schlammes geändert hat und auch länderspezifische Faktoren berücksichtigt werden müssten. Dies deshalb, weil die Referenzwerte für Primär- und Überschussschlamm älteren deutschen Daten entstammen und bereits eine andere Studie diese Diskrepanz schweizweit erkannt hat [9].

Abfackelung von Klärgas

Die Kennzahl N_1 entspricht dem Anteil an Klärgas, der nicht abgefackelt, sondern einer Nutzung (BHKW, Klärgasaufbereitung oder Heizung) zugeführt wird. Die Fackel wird auch als Notfackel bezeichnet, da sie nur dann zum Zuge kommt, wenn keine Nutzung möglich ist [24]. Da Methan ein um den Faktor 28 höheres Treibhausgaspotenzial als CO_2 aufweist [25], ist die Abfackelung deutlich weniger klimaschädlich, als wenn das überschüssige Klärgas direkt abgelassen würde. Von den 51 Klärschlammfaulungen verwenden zehn Anlagen anstelle der Fackel eine andere Möglichkeit zur Überschussgasvernichtung (Gasbrenner oder Reserve-BHKW). Abbildung 7 zeigt auf, dass der Gesamtnutzungsgrad für kleine und mittlere Anlagen deutlich über den Richtwerten liegt. Für grössere Anlagen ist der Gesamtnutzungsgrad etwas geringer.

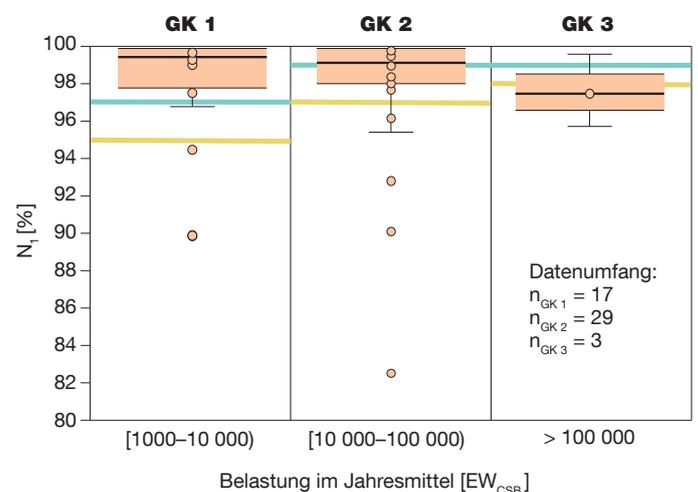


Abbildung 7: Grad der gesamten Klärgasnutzung (N_1). Die grüne Linie stellt den Idealwert dar, die gelbe den Richtwert über die entsprechende Grössenklasse.

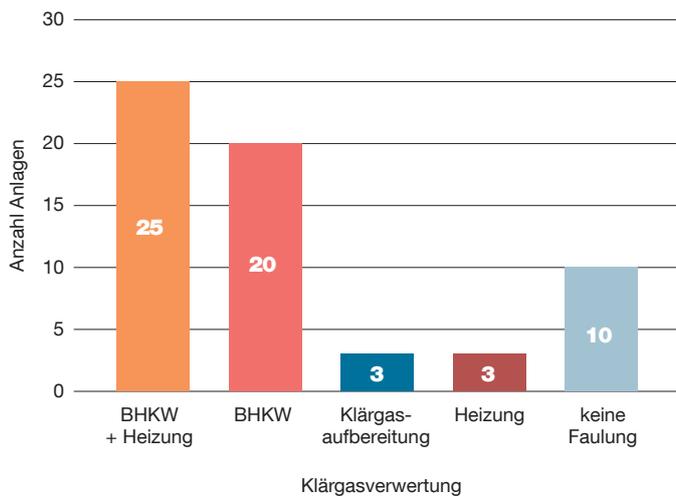


Abbildung 8: Klärgasverwertung der 60 Zürcher ARA und der zentralen Schlammbehandlungsanlage Pfannenstiel (ZSA). Die Anlage mit aerober Stabilisierung wurde mit einer fehlenden Faulung gleichgesetzt.



Klärgasaufbereitungsanlage auf dem Areal der ARA Werdhölzli. Die Aufbereitung dient der späteren Einspeisung ins Gasnetz. (©Biogas Zürich AG)

Energetische Verwertung von Klärgas

Für das anfallende Klärgas werden drei Verwertungsmethoden eingesetzt: Die Verstromung mittels BHKW, die Aufbereitung und Einspeisung ins Gasnetz sowie das Heizen mittels Gasbrenner (Abbildung 8). Die grösste ARA sowie zwei ARA in GK 2 betreiben eine Klärgasaufbereitungsanlage. Dadurch werden aktuell bereits 38 % der Klärgasproduktion auf diesem Wege verwertet (siehe Abbildung 11).

Verstromung von Klärgas

Nachfolgend wird der elektrische Wirkungsgrad der BHKW beurteilt. Dieser ergibt sich aus dem Verhältnis von generiertem Strom zu eingesetztem Klärgas. Der zu erwartende Wirkungsgrad hängt von der Grösse eines BHKW ab und bewegt sich zwischen 30 und 45 % [8]. Abbildung 9 zeigt den zu erwartenden Wirkungsgrad (orange Linie) im Vergleich zu den effektiven mittleren Wirkungsgraden (farbige Punkte) der BHKW auf Zürcher ARA. In den meisten Fällen liegt der effektive elektrische Wirkungsgrad deutlich unter dem Erwartungswert aus der Literatur.

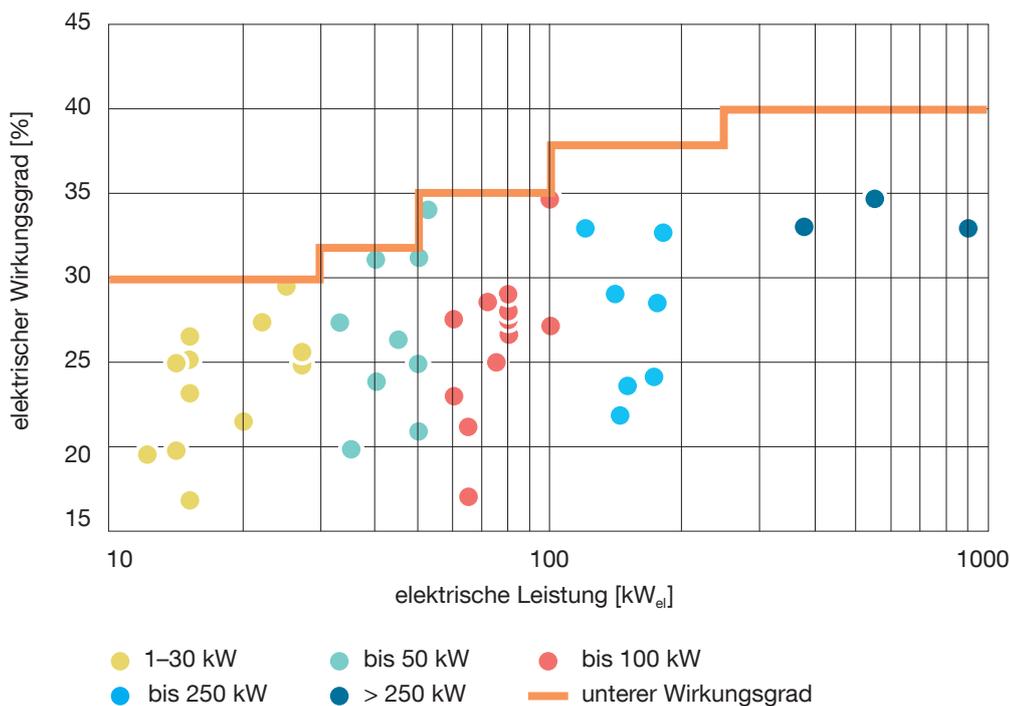


Abbildung 9: Elektrischer Wirkungsgrad (η_{el}) sowie verbaute elektrische Leistung sämtlicher BHKW auf Zürcher Klärgasverwertungsanlagen. Der untere Wirkungsgrad stammt aus dem Arbeitsblatt DWA-A 216 [8].



Das BHKW der ARA Winterthur-Hard ermöglicht eine Eigenversorgung > 75 %. Bei der Neuanschaffung wurde auf eine optimale Auslegung (Nennlastbetrieb), den Einsatz moderner Abgasreinigungsverfahren und der vollständigen Abwärmenutzung geachtet. (©Roger Müller)

Gemäss einer Studie des Bundesamts für Energie [26] sind insbesondere zwei Ursachen für einen verringerten Wirkungsgrad der BHKW verantwortlich. Einerseits werden viele Aggregate auf den maximalen Klärgasanfall dimensioniert. Dadurch ist ausreichend Kapazität vorhanden, um den schwankenden Klärgasanfall zu verstromen. Gleichzeitig muss aber die Anlage über längere Zeiträume im suboptimalen Teillastbereich mit reduziertem Wirkungsgrad betrieben werden. Auf der anderen Seite werden BHKW aber auch mit einem sogenannten Luftüberschuss betrieben, was ebenfalls zu einem tieferen Wirkungsgrad führt. Ziel dieser Betriebsstrategie ist es, die Stickoxidemissionen unter dem vorgegebenen Grenzwert zu halten. Hier gibt es jedoch andere technische Gegenmassnahmen (z.B. SCR-Katalysator oder Abgasrückführung), um die Stickoxidemissionen mit geringeren Einbussen beim Wirkungsgrad zu senken [26].

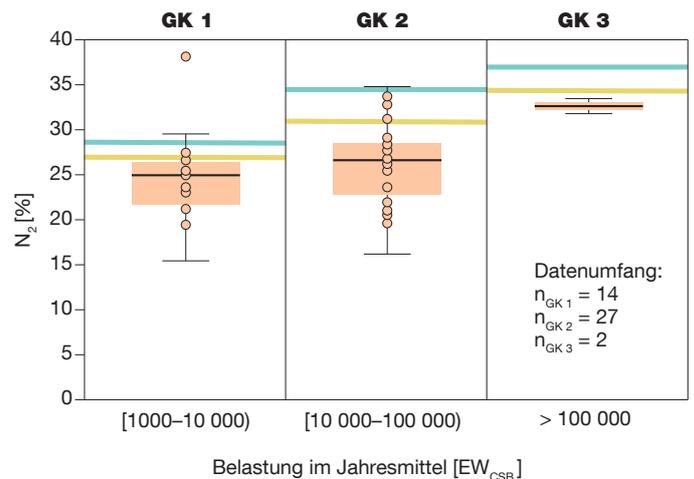


Abbildung 10: Grad der Klärgasumwandlung in Elektrizität (N_2). Die grüne Linie stellt den Idealwert dar, die gelbe den Richtwert über die entsprechende Grössenklasse.

Mikro-Gasturbinen, die deutlich tiefere elektrische Wirkungsgrade (24 bis 31 %) ausweisen [8], sind nach aktuellem Kenntnisstand lediglich auf drei ARA (Leistung unter 100 kW) anzutreffen.

Mit dem Grad der Klärgasumwandlung in Elektrizität (N_2) werden sämtliche Anlagen, bei welchen das BHKW den Hauptverwertungsweg darstellt, erfasst (Abbildung 10). Neben dem elektrischen Wirkungsgrad, der mit steigender Aggregatsgrösse ansteigt (Abbildung 9), fliesst ebenfalls der Anteil der Klärgasproduktion, der nicht verstromt wird, negativ mit ein.

Die Erhebung zeigt, dass die elektrischen Wirkungsgrade der BHKW Potenzial für eine Leistungsverbesserung haben. Dieses könnte durch eine intelligentere Auslegung der Aggregate (BHKW und Gasspeicher) und die Anwendung moderner Abgasreinigungsverfahren ausgeschöpft werden und liegt bei rund 26 % der Gesamtstromproduktionsmenge. Mit einer Reduktion der Verwendung von Klärgas für Heizung und Fackel auf insgesamt 1 % würde bei optimaler Verstromung ($\eta_{el} = 35$ %) lediglich eine weitere Zunahme um 6.5 % resultieren.

Kantonaler Gesamtenergiefluss 2020

Abbildung 11 zeigt die kantonal erfassten und mittels Literaturwerten abgeschätzten Energieflüsse für das Betriebsjahr 2020. Dabei wird zwischen Strom, Wärme und chemischer Energie/ Klärgas (gewonnen aus Abwasser bzw. Schlamm) unterschieden. Da bei Wärmeflüssen auch das Temperaturniveau relevant ist, wurde dieses mittels Farbschema integriert.

Das Klärgas der Zürcher ARA stammt praktisch vollständig aus der Verwertung von Frischschlamm. Die Co-Vergärung und die aerobe Stabilisierung hat keinen bedeutenden Einfluss auf die Klärgasproduktion.

96 % des Klärgases wird über ein BHKW verwertet oder aufbereitet und in das Erdgasnetz eingespeisen. Die Klärgasaufbereitung hat insbesondere für grosse ARA im Kanton Zürich einen zunehmend hohen Stellenwert. Dabei werden in drei ARA 38 % des gesamten Klärgases aufbereitet.

Die Schlammentsorgung erfolgt im Kanton Zürich seit 2015 zentral über eine Monoverbrennung am Standort Zürich-Werdhölzli. Dadurch ist auch die energetische Restverwertung des ausgefaulten und entwässerten Klärschlammes sichergestellt.

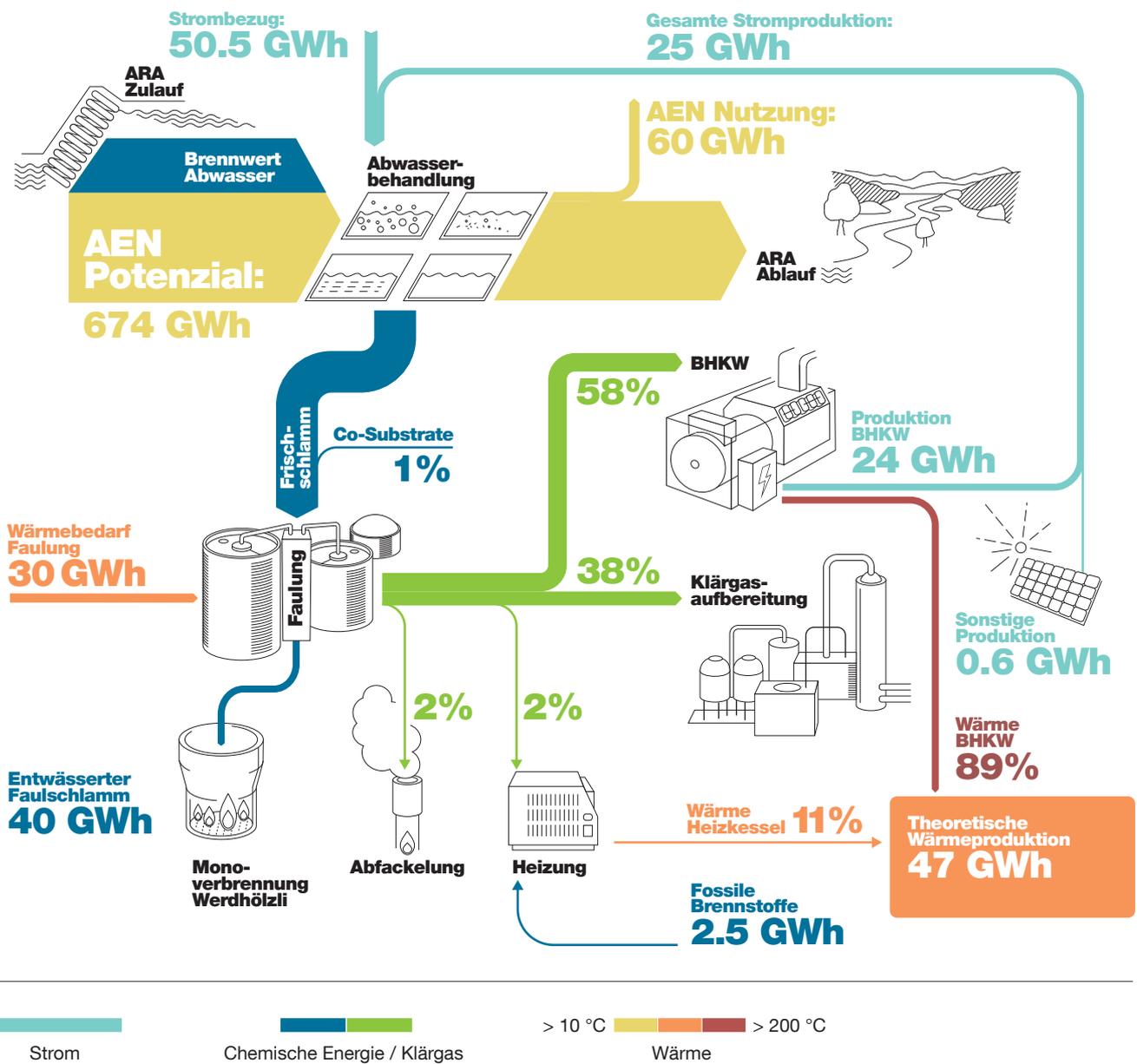


Abbildung 11: Energieflüsse auf Zürcher ARA für das Jahr 2020 in GWh/a (ohne Gewichtung unterschiedlicher Energieformen). Die Rohdaten sämtlicher Flüsse sind in Anhang D tabellarisch zusammengefasst. AEN steht für Abwasserenergienutzung.

Der Strombezug der Zürcher ARA ist ungefähr doppelt so hoch, wie deren Stromproduktion. Die aktuelle Eigenversorgung sämtlicher Zürcher ARA liegt somit bei 33 %. Die Eigenproduktion stammt in erster Linie aus dem Betrieb von BHKW. Zu beachten ist, dass durch die Klärgasaufbereitung im Kanton Zürich eine theoretische Stromproduktion (bei optimalem Wirkungsgrad) von etwa 22 GWh/a entfällt.

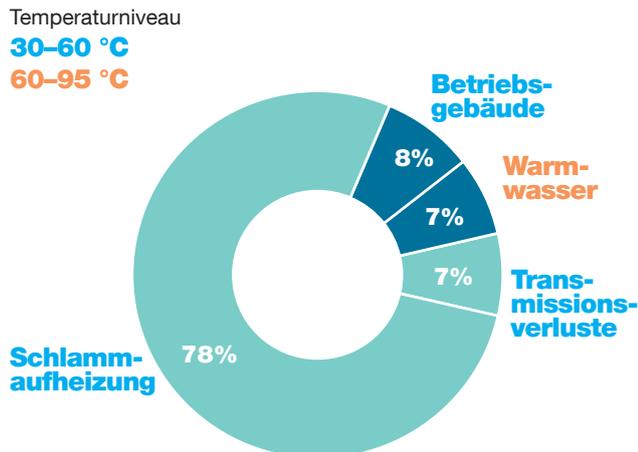


Abbildung 12: Aufteilung des Wärmebedarfs auf die zwei Verbrauchsgruppen Schlammbehandlung (grün) sowie Infrastruktur und Sonstiges (blau), basierend auf einer konventionellen Grosskläranlage [27]. Das Temperaturniveau der Wärmeverbraucher wird farblich unterschieden.



Erweiterbarer Wärmetauscher für gereinigtes Abwasser. In Kombination mit einer Wärmepumpe kann so das grösste energetische Potenzial einer ARA erschlossen werden. (©ERZ Entsorgung + Recycling Zürich)

Der Grossteil der Wärmeproduktion auf Zürcher ARA stammt aus der Abwärme der BHKW. Durch die Verbrennung von Klärgas und fossilen Brennstoffen wird lediglich ein Beitrag von 11 % zur Wärmeproduktion geleistet. Der Einsatz fossiler Brennstoffe ist oft notwendig, um saisonale Schwankungen und Spitzenlasten im Wärmebedarf auszugleichen (35 von 61 Anlagen). Auf der Verbraucherseite hat die Faulung mit Abstand den grössten Wärmebedarf (Abbildung 12).

Es ist davon auszugehen, dass auch die Zürcher ARA vom neuen Energiegesetz betroffen sind und den Ersatz eines Wärmeerzeugers mit fossilen Brennstoffen vertieft prüfen müssen (siehe Rechtsgrundlagen). Da das Temperaturniveau der Schlamm-aufheizung in einem Bereich von 30 bis 60 °C liegt, trifft die Ausnahmeregelung für Prozesswärme nicht zu. Massgebend wird folglich das Ausmass des Bezugs an fossilen Brennstoffen zur Spitzenlastdeckung sein, da dieses die Lebenszykluskosten entscheidend beeinflusst.

Das mit Abstand grösste energetische Potenzial auf ARA liegt in der Abwasserenergienutzung. Das Potenzial übertrifft bei weitem den chemischen Energiegehalt, den das Abwasser in Form von Organik mit sich führt. Die Nutzung dieses Potenzials liegt aktuell jedoch bei unter 10 %.

Schlussfolgerungen

Ausgehend von den Resultaten aus der Zusammenstellung der sieben Energiekennwerte und dem Gesamtenergiefluss wird aufgezeigt, wie der häushälterische Umgang mit Energie auf Zürcher ARA in Zukunft verbessert und die Energieeffizienz gesteigert werden könnte.

Strom

Um die Energieeffizienz zu steigern, muss der Stromverbrauch gesenkt und/oder die Stromproduktion erhöht werden. Das Einsparpotenzial beim Stromverbrauch sowie das Optimierungspotenzial der Stromproduktion über BHKWs wird wie folgt abgeschätzt:

Reduktion des Stromverbrauchs:
-7 % (- 5.5 GWh/a)

Steigerung des Wirkungsgrades der BHKW:
+ 26 % (+ 6.3 GWh/a)

Zusätzliche Verstromung Klärgas anstelle Heizung/Abfacklung:
+ 6.5 % (+ 1.6 GWh/a)

Abbildung 13 zeigt die Energieflüsse auf Zürcher ARA nach vollständiger Ausschöpfung der drei Potenziale. In der Summe ergibt sich aus den drei Potenzialen eine Steigerung des Eigenversorgungsgrads von 33 auf 47 %.

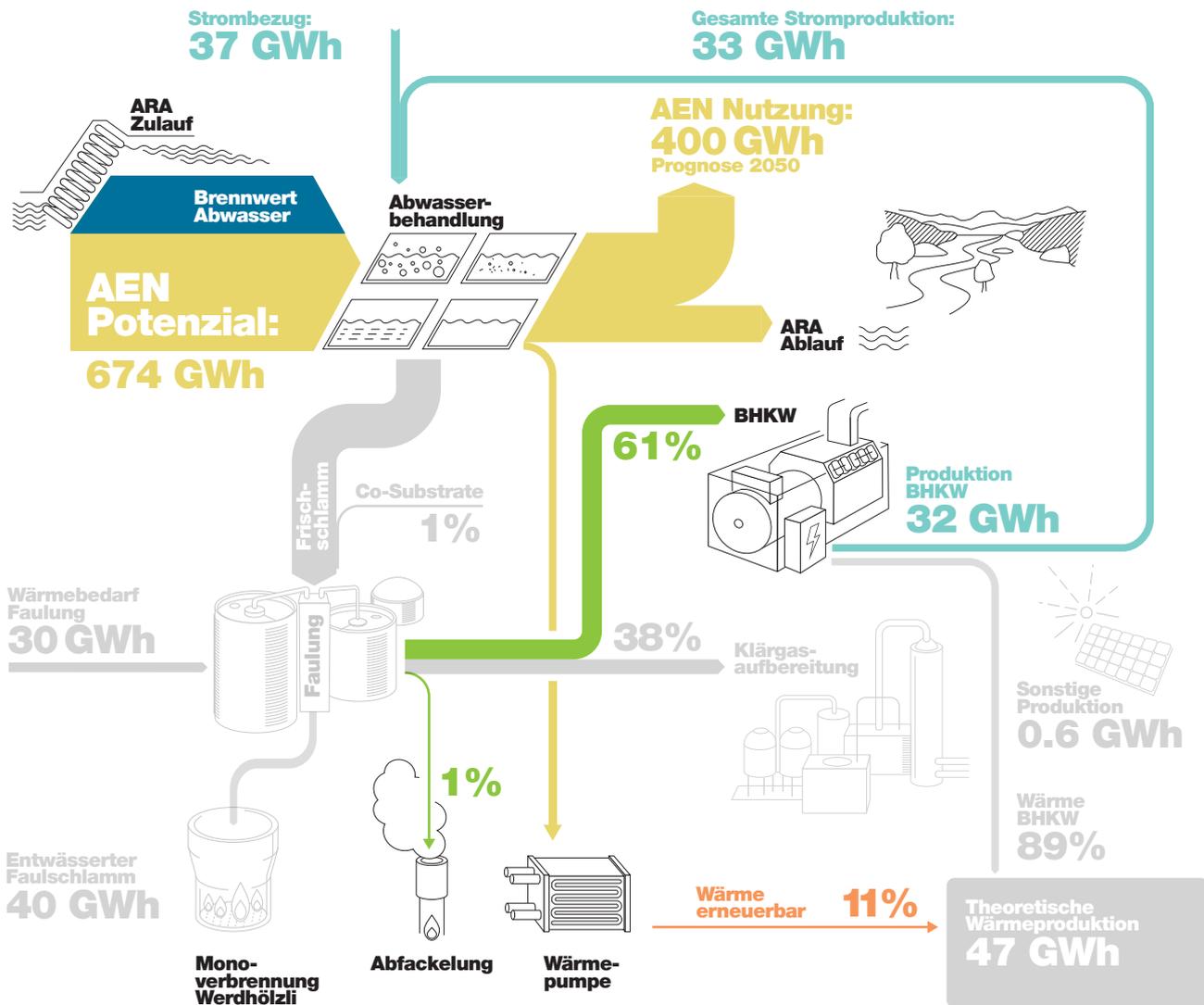


Abbildung 13: Zukünftige Energieflüsse auf Zürcher ARA nach Ausschöpfung der drei quantitativ abgeschätzten Optimierungspotenziale im Bereich Strom. Die zukünftige Abwasserenergienutzung (AEN) bezieht sich auf eine Prognose der Abteilung Energie des AWEL [28]. Der Wegfall der konventionellen Heizsysteme wird durch Wärmetauscher in Verbindung mit Wärmepumpen kompensiert. Die ausgegrauten Flüsse wurden auf dem Stand 2020 belassen.

Um die Energieeffizienz von ARA weiter zu steigern, könnten zukünftig neue Möglichkeiten in Betracht gezogen werden. Hier kommen die Co-Vergärung sowie der Einsatz von Fotovoltaik in Frage. Im Kanton Bern wird beispielsweise gut die Hälfte der vergärbaren Substrate aus Industrie und Gewerbe auf Berner ARA verarbeitet [29]. Für die Co-Vergärung müssen jedoch diverse Voraussetzungen sichergestellt sein. So muss die Faulung ausreichende Kapazitätsreserven besitzen und die zusätzliche Belastung des Faulwassers von der biologischen Reinigungsstufe verarbeitet werden können. Zudem sind Substrate ungeeignet, die zu deutlich grösseren Mengen an entwässertem Faulschlamm führen [30]. Berner ARA, die auf Co-Vergärung setzen, müssen zudem aufzeigen, dass das produzierte Klärgas vollständig und effizient genutzt wird [29]. Vergleichsweise einfacher ist der Einsatz von Fotovoltaik. Deren Installation führt zu keiner Beeinflussung der Schlammbehandlung oder Abwasserreinigung.

Die anaerobe Schlammfäulung entspricht dem Stand der Technik und spielt eine zentrale Rolle für die Energiebilanz einer ARA. Die aerobe Stabilisierung erfüllt die kantonale Forderung nach einem effizienten und sparsamen Umgang mit Energie hingegen klar nicht.

Wärme

Ein Eigenversorgungsgrad mit Wärme von 100 % wäre wünschenswert. Da bei der Klärgasaufbereitung der grösste Wärmelieferant automatisch wegfällt, sollte ein innovatives Wärmekonzept ausgearbeitet werden. So kann beispielsweise mittels der Wärmerückgewinnung aus dem Faulschlamm, der Gebläse und der Klärgasaufbereitung bereits ein Grossteil des Wärmebedarfs abgedeckt werden [9]. Der Wärmebedarf kann zudem durch die Isolierung des Faulturms und einer Schlamm-eindickung vor der Fäulung zusätzlich reduziert werden. Verbleibende Wärmedefizite könnten mit einer Abwasserwärmenutzung ganzjährig gedeckt werden [30].

Abwasserenergienutzung sollte nicht nur für ARA interne, sondern auch für externe Prozesse vermehrt angestrebt werden. Dies auch deshalb, weil aktuell noch 90 % des Wärmepotenzials nicht genutzt wird und gemäss dem Bericht «Lokale Energiequellen» bis 2050 ein Anstieg von 60 auf 400 GWh/a angestrebt wird [28]. Unter der Annahme, dass die Abwasserenergienutzung zukünftig vollständig umgesetzt wird, könnte damit knapp 6 % des prognostizierten kantonalen Wärmebedarfs im Jahr 2050 abgedeckt werden [28].

Zusammenschlüsse von ARA

Grössere Anlagen weisen einen deutlich geringeren spezifischen Stromverbrauch auf. Dieser Zusammenhang wurde auch in weiteren Studien zu Schweizer ARA aufgezeigt [9, 12]. Folglich sollte bei Studien zur Regionalisierung der Abwasserreinigung auch die Energieeffizienz berücksichtigt werden.

Klima

Für ARA sind insbesondere die verfahrensabhängigen Emissionen der Treibhausgase Methan und Lachgas relevant und sollten mittels geeigneter Messmethoden überprüft werden. Dadurch wird es möglich, neben dem Gesamtenergiefluss, auch die Gesamtklimabilanz einer ARA abzubilden. Positiv stimmt, dass eine durchdachte Prozessoptimierung mit dynamischer Regelung sowohl den Lachgasausstoss als auch den Energieverbrauch zu senken vermag, bei einer gleichzeitigen Zunahme der Reinigungsleistung [17].

In Zukunft wird der Anteil ARA, die ihr Klärgas einspeisen, voraussichtlich weiter zunehmen. Dies ist insbesondere bezüglich der Treibhausgasemissionen interessant, da aufgrund der Substitution von fossilem Erdgas, CO₂ eingespart werden kann [31]. Neben der Relevanz für die Eigenversorgung einer ARA mit Strom muss also folglich auch der spätere Verwendungszweck des aufbereiteten Biogases untersucht werden, um die Vorteile betreffend Treibhausgasemissionen abzuschätzen.

Weitere Empfehlungen

Der Vergleich der aktuellen Zürcher Kennzahlen mit den Richt- und Idealwerten des VSA [10] weist darauf hin, dass die Richt- und Idealwerte nicht mehr den aktuellen Gegebenheiten entsprechen. Eine Überarbeitung des Leitfadens sollte zeitnah auf Bundesebene erfolgen.

Das Grossverbrauchermodell und die Feinanalyse könnten einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz leisten. Die bisherigen Erfahrungen zeigen aber, dass das aufgezeigte Potenzial häufig nicht ausgeschöpft wurde. Hier könnte eine regelmässige Umsetzungskontrolle Abhilfe schaffen.

Massnahmenvorschläge

Tabelle 2 fasst die Erkenntnisse dieser Studie in Form von Massnahmenvorschlägen zur Förderung der Energieeffizienz auf ARA zusammen. Die Massnahmenplanung für Zürcher ARA wird nun auf Basis dieser Vorschläge in Zusammenarbeit mit den Abteilungen Energie sowie Luft, Klima und Strahlung ins Auge gefasst, und soll bis Ende 2022 vorliegen.

Tabelle 2: Massnahmenvorschläge zur Förderung der Energieautarkie auf ARA.

Bereich	Strom	Wärme
Planung/Genehmigung	Energieeffizientere Aggregate (Gebläse und Pumpen)	Spitzenabdeckung erneuerbar anstelle fossil
	Minimalwirkungsgrade BHKW (im Betrieb)	Isolierung Faulturm
	Zusammenschlüsse ARA	
Betrieb	Grossverbrauchermodell mit Umsetzungskontrollen	Erhöhte Schlammendickung vor Faulung
	Feinanalysen mit Umsetzungskontrollen	
	Nennlastbetrieb BHKW	
	Maximallaufzeit Fackel	
	Co-Vergärung	
Förderung	Fotovoltaik	Abwasserenergienutzung (ARA-intern sowie -extern)
	Dynamische Regelung	

Literaturverzeichnis

- [1] L. Eyemann, «Energieverbrauch der Schweizer Kantone,» Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), Wädenswil, 2014.
- [2] Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich, «stadt-zuerich.ch,» 25 August 2021. [Online]. Verfügbar: https://www.stadt-zuerich.ch/gud/de/index/umwelt_energie/energie-in-zahlen/endenergiebilanz.html.
- [3] AWEL, «Energieplanungsbericht 2017,» Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Abteilung Energie, Zürich, 2018.
- [4] M. Schärer, C. Abegglen, D. Dominquez, I. Purtschert und S. Weber, «Betrieb und Kontrolle von Abwasserreinigungsanlagen,» Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, 2014.
- [5] Beschluss des Kantonsrates über die Genehmigung der Änderung der Besonderen Bauverordnung I, Kanton Zürich, Antwort auf Antrag des Regierungsrates vom 14. Juli 2021 (5735).
- [6] Kantonaler Klärschlamm-Entsorgungsplan 2015, Festsetzung, Kanton Zürich, Regierungsratsbeschluss Nr. 1035/2011.
- [7] B. Kobel, B. Bangerter, C. Bassanello, D. Dürrenmatt, J. Kappeler, G. Koch, M. Moos, R. Moser, Wenger und René, «Energiedaten in ARA (Anhang Energie in ARA),» Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), Glattbrugg, 2015.
- [8] DWA, «Arbeitsblatt DWA-A 216. Energiecheck und Energieanalyse. Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen,» Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), Hennef, 2015.
- [9] E. Kind und G. Levy, «Energieeffizienz und Energieproduktion auf ARA,» Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, 2012.
- [10] A. E. Müller, B. Kobel, F. Schmid, G. Levy, E. Kind, R. Moser, R. Brügger, Y. Roth und E. Graf, «Handbuch Energie in ARA,» Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), Glattbrugg, 2008.
- [11] S. Binggeli und H.-P. Diener, «Definition und Standardisierung von Kennzahlen für die Abwasserentsorgung,» Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), Glattbrugg, 2016.
- [12] S. Binggeli, H. Diener und S. Lindtner, «Kosten und Leistungen der Abwasserentsorgung,» Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), Glattbrugg, 2011.
- [13] H. Kroiss und K. Svardal, «Energiebedarf von Abwasserreinigungsanlagen,» Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, S. 170-177, Dezember 2009.
- [14] AWEL, «Abwasserreinigung in Zahlen 2019,» Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Abteilung Gewässerschutz, Zürich, 2020.
- [15] E. Wortmann, Interviewpartnerin, Telefonat mit aquabench GmbH. [Interview]. Juli 2021.
- [16] S. Quarenghi und R. Moser, «Energie in ARA. Muster-Feinanalyse,» Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), Glattbrugg, 2018.
- [17] D. Braun, L. von Känel, W. Gruber, A. Joss, E. Morgenroth, H. Bauer und D. Gahler, «Dynamische Regelung der ARA Hofen,» Aqua & Gas, Zürich, 2022.
- [18] C. Abegglen und H. Siegrist, «Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen,» Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, 2012.
- [19] J. Gasse, T. Reinhardt, C. Meyer, G. Kolisch, Y. Taudien, H. Steinmetz, T. Morck, P. Baumann, B. Poppe und W. Maier, «Energieverbrauch von Teilprozessen auf kommunalen Kläranlagen,» KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, S. 802-808, September 2017.
- [20] dhp technology AG, «dhp-technology.ch,» 10 August 2021. [Online]. Verfügbar: <https://dhp-technology.ch/referenz/ueber-der-klaeranlage-eich-schwebt-das-erste-solarfaltdach-im-kanton-zuerich/>.
- [21] LANUV, «Abschlussbericht. Projekt Nr. 2: Verbesserung der Klärgasnutzung, Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen,» Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (LANUV), Wuppertal, 2014.
- [22] K.-H. Rosenwinkel, H. Kroiss, N. Dichtl, C.-F. Seyfried und P. Weiland, «Anaerobtechnik,» Springer Vieweg, Berlin, 2015.
- [23] DWA, «Merkblatt DWA-M 363. Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogas,» Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), Hennef, 2010.
- [24] FNR, «Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung,» Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow-Prüzen, 2016.

- [25] T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P. M. Midgley, «Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,» Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), New York, 2013.
- [26] P. Soltic, D. Edenhauser und A. Winkler, «Energetische Optimierung von Biogas – BHKWs,» Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 2008.
- [27] J. Pinnenkamp, F.-W. Bolle, S. Gredigk-Hoffmann, M. Loderhose, S. Miethig, K. Ooms, H. Riße und B. Wöffen, «Energie und Abwasser. Handbuch NRW,» Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein Westfalen, Düsseldorf, 2017.
- [28] AWEL, «Lokale Energiequellen,» Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Abteilung Energie, Zürich, 2016.
- [29] J. Suter, R. Manser und D. Dominguez, «Kennzahlenbericht - Energie auf ARA im Kanton Bern 2015,» Amt für Wasser und Abfall (AWA), Bern, 2016.
- [30] G. Levy, «Energieoptimierung auf Kläranlagen,» Gas Wasser Abwasser (GWA), 2009.
- [31] R. Zutter, R. Nijsen und T. Peyer, «Potential zur Effizienzsteigerung in Kläranlagen mittels Einspeisung oder Verstromung des Klärgases,» Swisspower Services AG, Zürich, 2015.
- [32] BAFU, «Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen,» Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, 2015.
- [33] P. Mostbauer, S. Lenz und N. Unger, «Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammasche. Endbericht,» Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Wien, 2017.
- [34] ERZ, «Zentrale Klärschlammverwertung Werdhölzli. Jahresbericht 2020,» Entsorgung + Recycling Zürich (ERZ), Zürich, 2020.
- [35] DWA, «Merkblatt DWA-M 380. Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Betrieben,» Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), Hennef, 2009.
- [36] B. Haberkern und B. Retamal Pucheu, «Auswertung des Förderschwerpunktes «Energieeffiziente Abwasseranlagen» im Umweltinnovationsprogramm,» Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2019.

Anhang

Anhang A – Parameter

Tabelle 3: Übersicht über die verwendeten Parameter für die Berechnung der Kennwerte und des Gesamtenergieflusses 2020. In der letzten Spalte wird auf die Quelle des numerischen Werts verwiesen.

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Quelle
Einwohnerwert Rohwasser	–	120 g CSB/EW*d	[11]
Einwohnerwert Ablauf VKB	–	80 g CSB/EW*d	[11]
Anteil des Methangas am Klärgas	g_{CH_4}	0.63	[9], Daten Zürcher ARA 2020
Heizwert Erdgas	$H_{i,Erdgas}$	10.1 kWh/m ³	[32]
Heizwert Erdöl	$H_{i,Erdöl}$	11.9 kWh/kg	[32]
Thermischer Wirkungsgrad Heizkessel	$\eta_{\text{thermisch,Heizkessel}}$	0.90	[21]
Thermischer Wirkungsgrad BHKW	$\eta_{\text{thermisch,BHKW}}$	0.50	[23]
Brennwert bei vollständiger Oxidation des CSB	$H_{S,CSB}$	14 kJ/g CSB	[13]
Heizwert der oTS	$H_{i,oTS}$	23 MJ/kg _{oTS}	[33, S. 73]
Glühverlust (Mittelwert ZH)	GV	0.74	Daten Zürcher ARA 2020
Heizwert des entwässerten Faulschlamm	$H_{i,Faulschlamm\ entwässert}$	0.450 MWh/t	[34]
Anteil oTS/TS von Fettabscheiderrückständen	$oTS_{\text{Fettabscheiderrückstände}}$	0.85	[35]
Methanausbeute von Fettabscheiderrückständen	$\eta_{CH_4, \text{Fettabscheiderrückstände}}$	650 l/kg _{oTS}	[35]
Spezifischer Wärmebedarf der anaerob-mesophilen Faulung	$e_{th, \text{Faulung}}$	15 kWh/EW*a	[10]

Anhang B – Formeln

Stromverbrauch

Der jährliche Stromverbrauch berechnet sich gemäss VSA [11] mittels folgender Formel:

$$\text{Strom}_{\text{Verbrauch}} = \text{Strom}_{\text{Bezug}} + \text{Strom}_{\text{Produktion}} - \text{Strom}_{\text{Verkauf}}$$

Folglich handelt es sich hier um den Strombedarf, der nötig ist, um die Reinigungsleistung einer ARA zu erbringen, unabhängig davon, wie und in welchem Ausmass auf der ARA Strom produziert und verkauft wird.

Einwohnerwert mittlere Belastung

Die Einwohnerwerte $EW_{CSB,120}$ wurden gemäss VSA [11] wie folgt berechnet:

$$EW_{CSB,120} = F_{CSB,RW} * \frac{1000 \text{ g/kg}}{120 \text{ g/EW*d}}$$

Dabei entspricht $F_{CSB,RW}$ der CSB-Tagesfracht im Mittel im Zulauf der ARA in kg/d. Für etwas weniger als die Hälfte der Anlagen waren lediglich Messungen im Ablauf der Vorklärung vorhanden, weshalb die Rohwasserfracht wie folgt approximiert wurde:

$$F_{CSB,RW} = F_{CSB,VKB} * \frac{120}{80}$$

Die mittlere Belastung ($EW_{CSB,120}$) ist mit Messunsicherheiten und Umrechnungsfehlern belastet. Analysen der Energieeffizienz, insbesondere über längere Zeitreihen, sind deshalb immer mit einer gewissen Vorsicht zu interpretieren, wie dies in der Literatur bereits erkannt wurde [36].

Klärgasproduktion

Die Klärgasproduktion ist in folgender Formel ausführlicher als vom VSA aufgeführt, wobei Kg stellvertretend für Klärgas verwendet wird:

$$Kg_{\text{Produktion}} = Kg_{\text{BHKW}} + Kg_{\text{Verkauf}} + Kg_{\text{Heizung}} + Kg_{\text{Abfackelung}}$$

Organische Fracht im Zulauf der Faulung

Die täglich anfallende organische Fracht im Zulauf der Faulung wurde wie folgt berechnet:

$$F_{\text{Zulauf Faulung (oTS)}} = F_{\text{Frishschlamm,TS}} * GV$$

In die Berechnung fliesst folglich die Bestimmung des Glühverlusts, der Trockensubstanz sowie die Schlammflussmessung im Zulauf der Faulung ein.

Anhang C – Belastung und Strom 2011

In Abbildung 14 sind ältere Daten des Kantons Zürich für das Jahr 2011 ausgewertet worden. Ein Vergleich mit den Daten aus dem Jahre 2020 (Abbildung 1) zeigt, dass es zu einer Abnahme der Anzahl Anlagen in GK 1 und zu einer Zunahme der Anlagen in GK 2 und GK 3 gekommen ist. Hierfür verantwortlich waren Aufhebungen kleinerer ARA (insgesamt sechs aus GK 1) sowie der Ausbau von bestehenden ARA aufgrund des

Anstiegs der Belastung. Als Folge dessen wird heute ein grösserer Anteil der Belastung auf grossen ARA behandelt. Zudem war die gewichtete Auslastung pro Grössenklasse schlechter. Gemäss [13] ist eine ARA bei einer Auslastung unter 75 % schlecht ausgelastet, was sich negativ auf die Energieeffizienz der ARA auswirken kann.

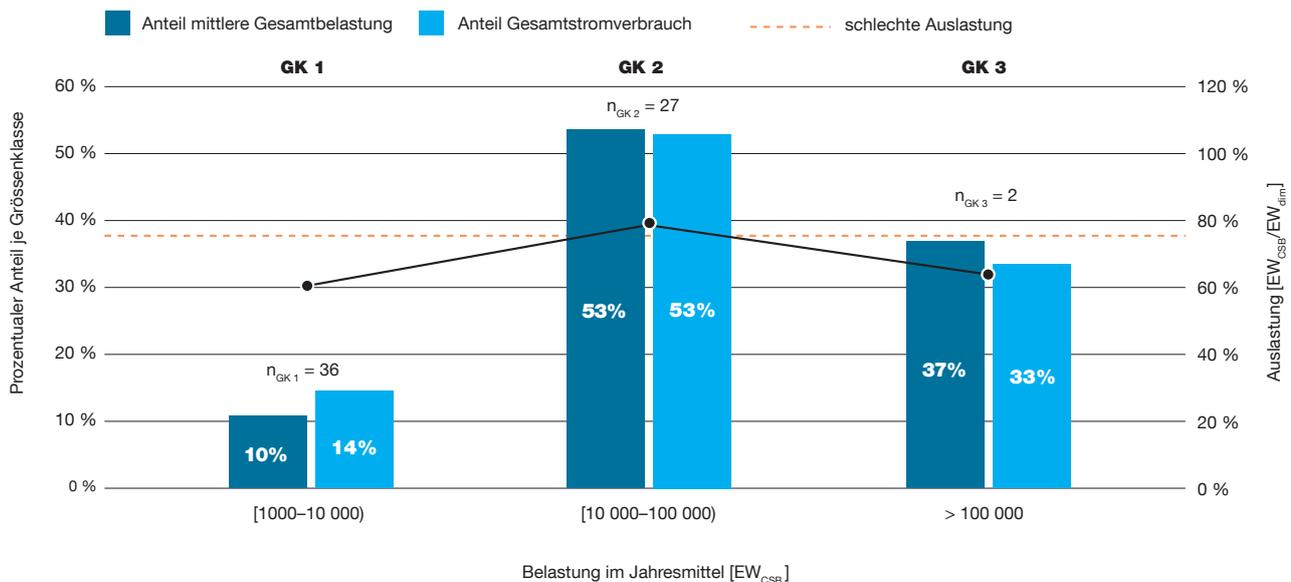


Abbildung 14: Relation zwischen dem Gesamtstromverbrauch und der Belastung im Jahresmittel für das Jahr 2011. Zusätzlich ist auf der Sekundärachse noch die gewichtete Auslastung innerhalb der Grössenklasse dargestellt. Eine schlechte Auslastung ist gemäss [13] unter 75 % gegeben (siehe rote Linie).

Tabelle 4 fasst die kumulierte Belastung und den kumulierten Stromverbrauch der 65 (2011), respektive 60 (2020) ARA mit > 1 000 EW_{CSB} zusammen. Sie bilden die Datengrundlage für Abbildung 1 und Abbildung 14. Zusätzlich ist rechts der gewichtete mittlere spezifische Gesamtstromverbrauch ersichtlich.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Datengrundlage für Abbildung 1 und Abbildung 14 sowie des mittleren gewichteten spezifischen Gesamtstromverbrauchs je Grössenklasse. Das Total im Jahr 2020 weicht von den sonst im Bericht erwähnten 76 GWh ab, da die ZSA nicht mitberücksichtigt wurde. Die letzte Spalte «Verbesserung» zeigt auf, um wie viel sich der spezifische Gesamtstromverbrauch innerhalb der knapp 10 Jahren verändert hat.

	2011		2020		Spez. Gesamtstromverbrauch [kWh/EW*a]		
	Belastung [EW _{CSB}]	Strom [GWh]	Belastung [EW _{CSB}]	Strom [GWh]	2011	2020	Verbesserung
GK 1	155 000	10	122 000	6	65	49	– 24 %
GK 2	798 000	37	927 500	37	47	40	– 14 %
GK 3	550 000	23	963 500	32	42	33	– 21 %
Total	1 503 000	70	2 013 000	75	47	37	– 20 %

Anhang D – Kantonaler Gesamtenergiefluss 2020

Tabelle 5: Zusammenstellung der Rohdaten, die die Grundlage des kantonalen Gesamtenergieflusses bilden. Es ist ebenfalls die Art und Weise der Berechnung angegeben. Die benötigten Umrechnungsfaktoren zwischen unterschiedlichen Einheiten werden in der Tabelle nicht angegeben.

Energieart	Flussbezeichnung	Energiefluss 2020 [MWh]	Berechnung
Strom	Strombezug ¹	50 500	$\text{Strom}_{\text{Verbrauch}} - \text{Gesamte Stromproduktion}$
	Gesamte Stromproduktion	25 000	$\text{Strom}_{\text{BHKW}} + \text{Strom}_{\text{PV}} + \text{Strom}_{\text{Übrige}}$
	Produktion BHKW	24 400	$\text{Strom}_{\text{BHKW}}$
	Sonstige Produktion	600	$\text{Strom}_{\text{PV}} + \text{Strom}_{\text{Übrige}}$
Chemische Energie	Brennwert Abwasser	343 400	$F_{\text{CSB,RW}} * H_{\text{S,CSB}}$
	Frischschlamm	248 600	$F_{\text{Frischschlamm,TS}} * GV * H_{\text{i,oTS}}$
	Co-Substrate	2 300	$F_{\text{Co-Substrat,TS}} * \text{oTS}_{\text{Fettsäurerückstände}} * \eta_{\text{CH4,Fettsäurerückstände}} * H_{\text{i,Erdgas}}$
	Entwässerter Faulschlamm	39 700	$F_{\text{Faulschlamm,entwässert}} * H_{\text{i,Faulschlamm,entwässert}}$
Biogas	BHKW	83 600	$\text{Klärgas}_{\text{BHKW}} * g_{\text{CH4}} * H_{\text{i,Erdgas}}$
	Klärgasaufbereitung	55 000	$\text{Klärgas}_{\text{Verkauf}} * g_{\text{CH4}} * H_{\text{i,Erdgas}}$
	Heizung	3 500	$\text{Klärgas}_{\text{Heizung}} * g_{\text{CH4}} * H_{\text{i,Erdgas}}$
	Abfackelung	2 700	$\text{Klärgas}_{\text{Abfackelung}} * g_{\text{CH4}} * H_{\text{i,Erdgas}}$
Wärme	AEN Potenzial ²	674 400	$Q_{\text{d,TW,3T}} * \Delta T(5 \text{ K}) * 5200 \text{ h/a}$
	AEN Nutzung	60 000	Abteilung Energie, Stand 2018
	Wärme Heizkessel	5 400	$\eta_{\text{thermisch Heizkessel}} * (\text{Heizung} + \text{Fossile Brennstoffe})$
	Fossile Brennstoffe	2 500	$F_{\text{Heizöl}} * H_{\text{i,Heizöl}} + Q_{\text{Erdgas}} * H_{\text{i,Erdgas}}$
	Wärme BHKW	41 800	$\eta_{\text{thermisch BHKW}} * \text{BHKW}$
	Wärmebedarf Faulung	30 000	$EW_{\text{CSB,120}} * e_{\text{th,Faulung}}$

¹ Im Jahre 2020 lag der Strombezug ab Elektrizitätswerk gesamthaft bei 63 500 MWh. Dies ergibt sich aus dem Verkauf von Strom aus Eigenproduktion im Umfang von 13 000 MWh. Für den Gesamtenergiefluss wurde dieses Detail vernachlässigt und stattdessen die gesamte Eigenproduktion der ARA selbst gutgeschrieben.

² Das AEN Potenzial wurde im «Energieplanungsbericht 2017» des AWEL [3] anhand der in Tabelle 5 angegebenen Formel berechnet. Dabei wird die mittlere Abwassermenge am dritten Tag ohne Niederschlag ($Q_{\text{d,TW,3T}}$) sowie eine reduzierte Betriebsdauer von 5 200 h/a verwendet. Verwendet man stattdessen die mittlere jährlich behandelte Abwassermenge sowie einen uneingeschränkten Betrieb (8 760 h/a) fällt das Potenzial um 46 % höher aus.

Anhang E – Zusammenfassung der Energiekennwerte

In Tabelle 6 sind sämtliche Medianwerte der Energiekennwerte 2020 ersichtlich. Diese wurden analog zu den Abbildungen im Bericht in die drei Grössenklassen unterteilt.

Tabelle 6: Übersicht über die sieben Energiekennwerte sowie des elektrischen Wirkungsgrads der BHKW.

Energiekennwert/ Wirkungsgrad	[1 000–10 000) GK 1	[10 000–100 000) GK 2	> 100 000 GK 3
e_{ges} [kWh/EW*a]	49	40	33
e_{BB} [kWh/EW*a]	27	20	18
e_{KG} [l/EW*d]	33	29	35
N_3 [l/kgöTS]	552	559	579
N_1 [%]	100	99	98
N_2 [%]	25	27	33
V_E [%]	30	38	61
η_{el} [%]	25	27	33

