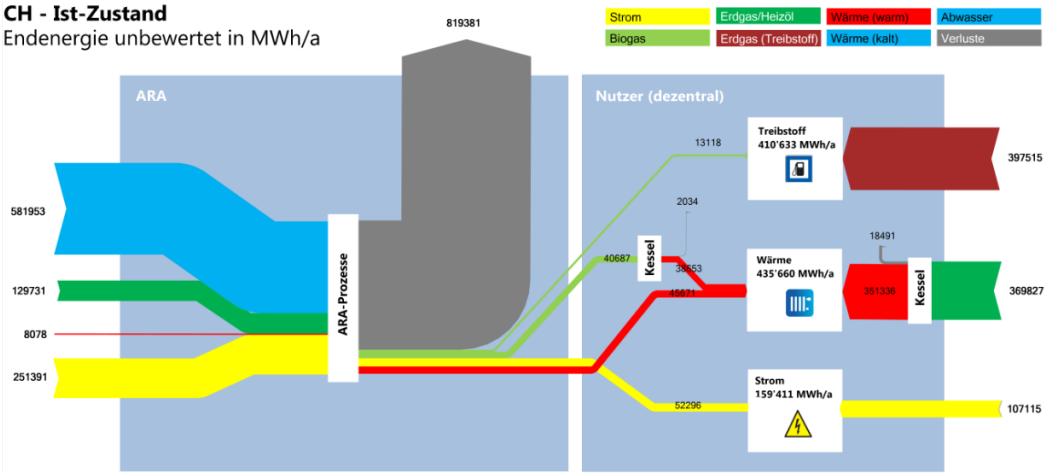
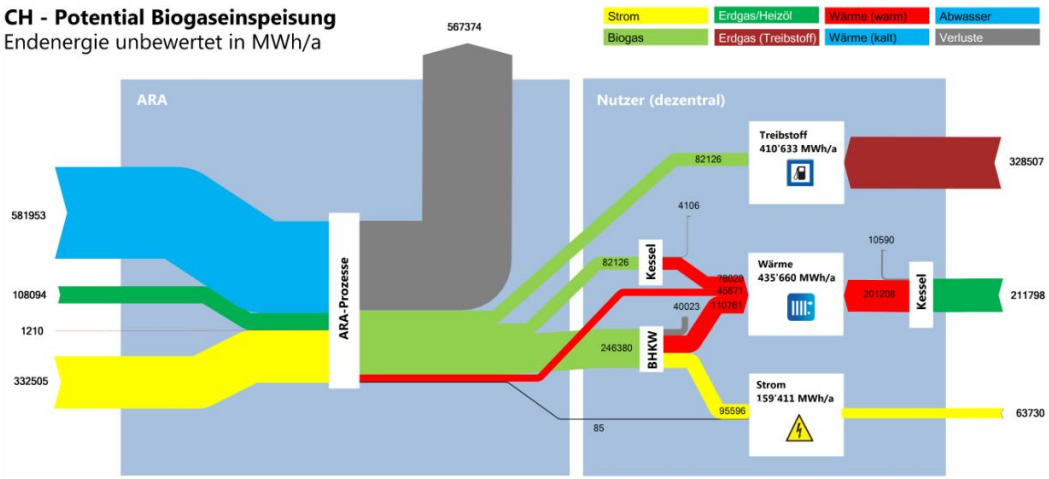
swisspower

Studie
Potential zur Effizienzsteigerung in Kläranlagen mittels Einspeisung oder Verstromung des Klärgases

Bericht
Revision 3
12. August 2015





Autoren
Ruedi Zutter, Durena AG ruedi.zutter@durena.ch
René Nijsen, Durena AG, rene.nijsen@durena.ch
Thomas Peyer, Swisspower Services AG, thomas.peyer@swisspower.ch

Koordination Begleitgruppe
Daniel Lehmann Pollheimer,
Organisation Kommunale Infrastruktur (OKI)
Monbijoustrasse 8, Postfach 8175, 3001 Bern

Begleitgruppe
Beat Ammann, arabern
Christoph Egli, AVA Altenrhein
Gian Andri Levy. Holinger AG
Pascal Favre, Cosvegaz SA
Aric Gliesche, BAFU
Peter Hunziker, Hunziker Betatech AG
Christian Müller, IBAarau AG
Ulrich Nyffenegger, Kanton Bern
Beat Kobel, Ryser Ingenieure AG, Bern
Manfred Tschui, Holinger AG
Markus Hürlimann, AVA Altenrhein
Matthieu Buchs, BFE

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen in diesem Bericht sind ausschliesslich die Autoren des Berichts verantwortlich.

Impressum
Swisspower Services AG
Bändliweg 20
8048 Zürich

Würdigung

Die vorliegende Studie/dieser Bericht wurde mit finanzieller Unterstützung von EnergieSchweiz erarbeitet/verfasst.

Zusätzlich wurde die Studie von folgenden Unternehmen unterstützt:

- ara region bern ag
- ARA Thunersee
- AVA Altenrhein
- ERZ Entsorgung + Recycling Zürich
- REAL, Emmenbrücke
- GVRZ, Kläranlage Schönau
- ProRheno AG, Basel
- Service d'assainissement Vile de Lausanne
- SIG-environnement
- GVM, Arlesheim
- GAZNAT, Vevey
- IBAarau Wärme AG
- Scheco AG, Winterthur
- Swisspower Services AG, Zürich
- Durena AG, Lenzburg

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung 5
2 Einleitung 13
3 Methodik 17
3.1 Grundlagen und Systemgrenzen 17
3.2 Randbedingungen und Umrechnungsfaktoren 22
4 Betrachtung einzelner typischer ARA auf Basis von IST-Daten 25
4.1 Einleitung 25
4.2 ARA 1 (83'000 EW) 26
4.3 ARA 2 (145'000 EW) 30
4.4 ARA 3 (200'000 EW) 33
4.5 KVA-Abwärme 36
5 Schweizerisches Potential 37
5.1 Einleitung 37
5.2 Grundlagen und Randbedingungen 37
5.3 Zustand heute 39
5.4 Theoretisches Potential 43
5.5 Vergleich Ist-Zustand und Potential 45
6 Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit 46
7 Beurteilung und Ausblick 50
7.1 Beurteilung 50
7.2 Ausblick / Vision 54
8 Abkürzungen und Glossar 55
8.1 Abkürzungen 55
8.2 Glossar 55
9 Abbildungsverzeichnis 58
10 Anhang 60
10.1 Anhang 1: ARA 1 Energieflussdiagramm (Stand heute) 60
10.2 Anhang 2: ARA 1 Energieflussdiagramm (Einspeisung Biogas) 60
10.3 Anhang 3: ARA 1 Primärenergie und Treibhausgasemissionen 60
10.4 Anhang 4: ARA 2 Energieflussdiagramm (Stand heute) 60
10.5 Anhang 5: ARA 2 Energieflussdiagramm (Einspeisung Biogas) 60
10.6 Anhang 6: ARA 2 Primärenergie und Treibhausgasemissionen 60
10.7 Anhang 7: ARA 3 Energieflussdiagramm (Stand heute) 60
10.8 Anhang 8: ARA 3 Energieflussdiagramm (Einspeisung Biogas) 60
10.9 Anhang 9: ARA 3 Primärenergie und Treibhausgasemissionen 60
10.10 Anhang 10: Energieflussdiagramm Ist-Zustand 60
10.11 Anhang 11: Energieflussdiagramm Schweizer Potential 60
10.12 Anhang 12: Primärenergie und Treibhausgasemissionen Potential 60
10.13 Anhang 13: Berechnung Faktoren Strommix 60
10.14 Anhang 14: Berechnungen 60

1 Zusammenfassung

In Kürze

Viele Abwasserreinigungsanlagen (ARA) in der Schweiz nutzen das bei der Schlammfaulung anfallende Klärgas in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) selber und decken damit ihren Strom- und Wärmeeigenbedarf teilweise ab. Das ist heute ein etablierter Standard und leistet einen wichtigen Beitrag zur erneuerbaren Stromproduktion. Gesamthaft beträgt die Stromgewinnung aus Schweizer Kläranlagen rund 120 GWh pro Jahr. Allerdings wird dennoch ein Teil des Klärgases heute ungenutzt über die Fackel vernichtet. Auch die BHKW-Abwärme kann auf den meisten ARA nicht vollständig genutzt werden.

Mit dem Hintergrund eine nachhaltige und CO_2-arme Energienutzung zu erzielen, ist eine möglichst vollständige Verwertung der Energie im Klärgas anzustreben, insbesondere auch der Wärme, die bei der Verbrennung entsteht. Auf dieser Basis werden nachfolgend die Verstromung (BHWK) und die Aufbereitung von Klärgas zu Biogas mit Einspeisung ins Gasnetz verglichen.

Die vorliegende Studie zeigt, dass mit der Biogaseinspeisung zwar der Primärenergiebedarf innerhalb der betrachteten 99 ARA steigt, jedoch mit Einbezug der Biogasverwendung beim dezentralen Nutzer die Energieeffizienz um 10 - 14% gesteigert werden kann.

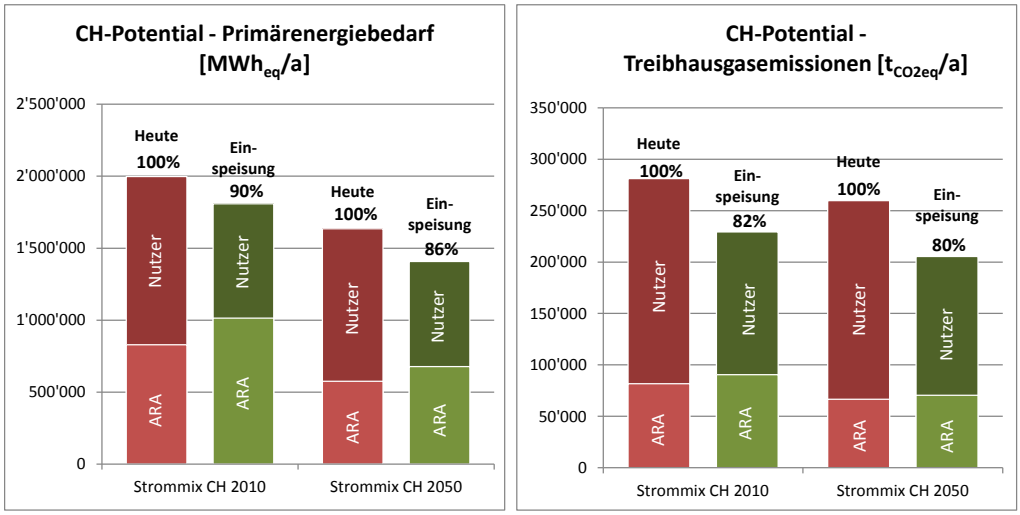


Abbildung 1: Vergleich Primärenergie und Treibhausgasemissionen Ist-Zustand und Potential

Diese gesamtheitliche Betrachtung schliesst die dezentrale Verwendung des Biogases sei es in der Mobilität (Gasfahrzeuge), zum Heizen oder zur dezentralen Stromproduktion (Wärme-Kraft-Kopplung) mit ein. Die unterschiedlichen Energieformen (Strom, Wärme, etc.) wurden mittels Primärenergiefaktoren (ESU/KBOB) gewichtet. Erst damit wird ein Systemvergleich zwischen Verstromung und Einspeisung überhaupt möglich. Die Primärenergiefaktoren beinhal-

ten die der Energieanwendung vorgelagerten Verlusteund zeigen den gesamten Rohstoffbedarf auf. Die hochwertige Energiebereitstellung (hoher Exergiegehalt) wird mit dieser Methode nicht ausgeblendet, sondern ist sowohl bei der Variante BHKW-Verstromung, als auch bei der Einspeisung und dezentralen Nutzung in einer Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) möglich.

Die dezentrale Nutzung des eingespeisten Klärgases wurde jedoch auf die drei Anwendungsbereiche Mobilität, Heizen und WKK-Anwendungen (BHKW) beschränkt. Die weitergehende Nutzung des lokal und dezentral produzierten Stromes zu Wärme mittels Wärmepumpe wird im Bericht nicht weiter erläutert. Berechnungen haben jedoch gezeigt, dass auch dann die Biogaseinspeisung besser abschliesst.

Unabhängig davon, ob das eingespeiste Gas für die Mobilität, das Heizen oder dezentrale WKK-Anlagen eingesetzt wird, schliesst die Biogaseinspeisung energetisch besser ab. Noch grösser sind die Vorteile der Biogaseinspeisung im Vergleich zum BHKW auf der ARA bei der Reduktion von Treibhausgasemissionen (Reduktion 14 - 28%, siehe Abbildung 2).

Weil ohne BHKW keine Wärme mehr auf der ARA produziert wird, kann bei einer Biogaseinspeisung die Wärme bedarfsgerecht erzeugt werden. Als Wärmequellen können bereits vorhandene Abwärmepotentiale aus den Abwasserreinigungsprozessen mittels Wärmerückgewinnung (WRG) oder Abwasserwärmepumpen genutzt werden. Der entsprechende Energiebedarf für die Wärmebereitstellung aus Abwärmequellen wurde in allen Betrachtungen eingerechnet.

Die Gaseinspeisung schneidet hauptsächlich wegen folgenden Kriterien besser ab:

- Der Wärmebedarf der ARA bedarfsgerecht (wärmegeführt) abgedeckt werden kann,
- die Energieverluste von der ARA bis zum Nutzer des Biogases minimiert werden,
- WRG Potentiale aus ARA-Prozessen zu wirtschaftlichen interessanten Bedingungen genutzt werden (bzw. die Abwärme bei der Verstromung wegen der anfallenden Überschusswärme aus dem BHKW nicht genutzt werden),
- die Abwasserwärmenutzung eine wesentliche Steigerung der Effizienz zur Folge hat,
- Substitutionseffekte des eingespeisten Klärgases vor allem in der Mobilität und beim Heizen hohe CO_2-Einsparpotentiale generieren.

Ausgangslage

Heute wird das auf den Schweizerischen ARA anfallende/produzierte Klärgas meistens mit BHKW in Strom und Wärme umgewandelt. Ein Grossteil davon wird für die ARA selbst genutzt und trägt wesentlich zu einer teilweisen, oft sogar vollständigen Energieautarkie dieser Anlagen bei. Oft muss dabei sogar Überschusswärme ungenutzt an die Umgebung abgegeben werden. Diese Überschusswärme wird in der Regel über den Kühlkreislauf des Gasmotors vernichtet.

Deshalb fällt dieser Verlust in der Energiebilanz einer ARA in den seltensten Fällen auf.

In den letzten Jahren hat sich die Aufbereitung des Klärgases zu Biogas und Einspeisung in das Erdgasnetz als eine praxiserprobte Alternative etabliert. Insbesondere im Zeitpunkt eines notwendigen Ersatzes eines ARA-BHKW stellt sich damit die Frage, ob ein BHKW auf der ARA oder die Einspeisung des Biogases ins Erdgasnetz sinnvoller ist.

Mit der Einspeisung von Klärgas entfällt die Wärmeerzeugung aus dem BHKW. Folglich muss die Wärme für die ARA internen Verbraucher (Faulschlamm, Gebäudeheizung, etc.) anderweitig erzeugt werden. Es stehen verschiedene Optionen (WRG, Abwasserwärmepumpe, Abwärme aus KVA, etc.) zur Auswahl. In Kombination mit der Einspeisung drängt sich die WRG aus den ARA Prozessen auf. Im BAFU Bericht „Energieeffizienz und Energieproduktion auf ARA" (Holinger im Auftrag des BAFU; November 2012) wurde bei einer ARA mit Klärgaseinspeisung ein WRG Anteil von rund 80% nachgewiesen.

Diesem positiven Effekt wird in der nachfolgenden Bilanzierung Rechnung getragen. Es wird mit einem mittleren Wert von 60% WRG Anteil gerechnet.

Fragestellung

In der vorliegenden Studie wird die Verwertung des auf einer ARA anfallenden Klärgases mittels BHKW oder Einspeisung analysiert und das damit verbundene Potential zur Effizienzsteigerung aus verschiedenen Betrachtungswinkeln abgeschätzt, insbesondere mit Fokus auf die Zielsetzungen der Energiestrategie des Bundes und des Klimaschutzes (Treibhausgase/CO_2).

Vorgehen, Methodik und Abgrenzung

Dazu wurden zunächst für typische Anlagegrössen und -typen mit realen Daten d.h. auf Basis von gemessenen Ist-Werten, die Energieflüsse sowie die Energie- und Treibhausgasbilanzen beider Optionen erstellt und mittels Umrechnung auf den Primärenergiebedarf miteinander verglichen. Diese Gewichtung der Energieflüsse mittels den anerkannten Primärenergiefaktoren ermöglicht den Vergleich der verschiedenen Energieformen (Strom, Wärme, etc.) und berücksichtigt indirekt ihre Wertigkeit. Danach wurde auf einer breiten Datenbasis eines Grossteils der Schweizer Anlagen das Schweizerische Potential für ARA mit der Möglichkeit der Einspeisung in das Erdgasnetz hochgerechnet.

Um eine ganzheitlichere Betrachtung zu erreichen, wurde die betrachtete Systemgrenze vom ARA-Standort jeweils auf die dezentrale, ARA-externe Energienutzung erweitert, denn nur so kann auch die dezentrale Nutzung des eingespeisten Biogas aus dem Erdgasnetz bei der Bilanzierung einbezogen werden.

Es wurden alle ARA mit mehr als 30'000 EW (Einwohnerwert) bzw. mehr als 300'000 m^3/a Klärgas mit einem vorhandenen Erdgasnetz in der entsprechenden Gemeinde untersucht, insgesamt 99 Standorte. All diese ARA wurden in typgleiche Kategorien unterteilt und anhand realer, gemessener Daten energietechnisch modelliert. Fehlende Daten wurden durch Recherche oder falls keine Daten öffentlich verfügbar waren durch Abschätzungen anhand von Fachliteratur fest-

gelegt.

Im daraus errechneten Potential sind weitere Biogas-Potentiale aus industriellen ARA, Steigerungen bei den Co-Substraten, kleine ARA / ARA ohne Erdgasnetz und die Kompogasanlagen nicht enthalten, ebenso wenig die energetisch sehr sinnvolle ARA-externe Abwasserwärmenutzungen mittels eines Wärme- oder Anergienetzes.

Das so ermittelte Potential dürfte deshalb dem konservativ ermittelten technischen Potential entsprechen.

Energieflüsse, die die Systemgrenzen überqueren, wurden mit den entsprechenden Primärenergie- und Treibhausgasfaktoren gemäss KBOB bzw. ESU-Services bewertet bzw. in Äquivalente umgerechnet und damit vergleichbar gemacht.

Energie- und Treibhausgasbilanz

Der Vergleich von Energie und Treibhausgasen kann nicht nur innerhalb der ARA Prozesse erfolgen, weil insbesondere mit der Einspeisung ein hoher Substitutionseffekt bei der dezentralen Nutzung entsteht. Deshalb muss eine Systemgrenze über die ARA hinaus gewählt werden. Die Einspeisung von Klärgas führt vor allem bei der Nutzung von Abwasserwärme in der ARA zu einem höheren Stromverbrauch. Weitet man die Systemgrenzen aber auf die dezentrale Nutzung aus, schneidet die Biogaseinspeisung energetisch besser ab. Noch grösser sind die Unterschiede zugunsten Biogaseinspeisung in der Treibhausgasbilanz.

Dezentrale Nutzungsoptionen

Bei der lokalen BHKW Verstromung in der ARA wird Strom und Wärme genutzt. Sobald das Klärgas im Erdgasnetz eingespeist wurde, sind verschiedene Nutzungsoptionen möglich. Biogas wird heute im Bereich der Mobilität, Heizen und für WKK-Anwendungen eingesetzt. Um keinen Anwendungsbereich auszugrenzen, bzw. um die gesamte Spannbreite der Auswirkungen auf den Primärenergiebedarf bzw. die Treibhausgasemissionen aufzuzeigen, wurden die Bilanzen für jeden Verwertungspfad gerechnet. Das heisst, das eingespeiste Klärgas wird jeweils zu 100% in der Mobilität, zum Heizen oder zur dezentralen Verstromung mittels BHKW eingerechnet. Die Resultate zeigen, dass sowohl beim Primärenergiebedarf, als auch bei den Treibhausgasemissionen mit der Einspeisung durchwegs eine Verbesserung gegenüber der heutigen Nutzung erzielt werden könnte.

Vor allem die Reduktionspotentiale beim CO_2-Ausstoss liegen beim Verwertungspfad Mobilität und Heizen ca. 20-30% tiefer, also rund 40‘000-60‘000 t CO_2 pro Jahr könnten eingespart werden.

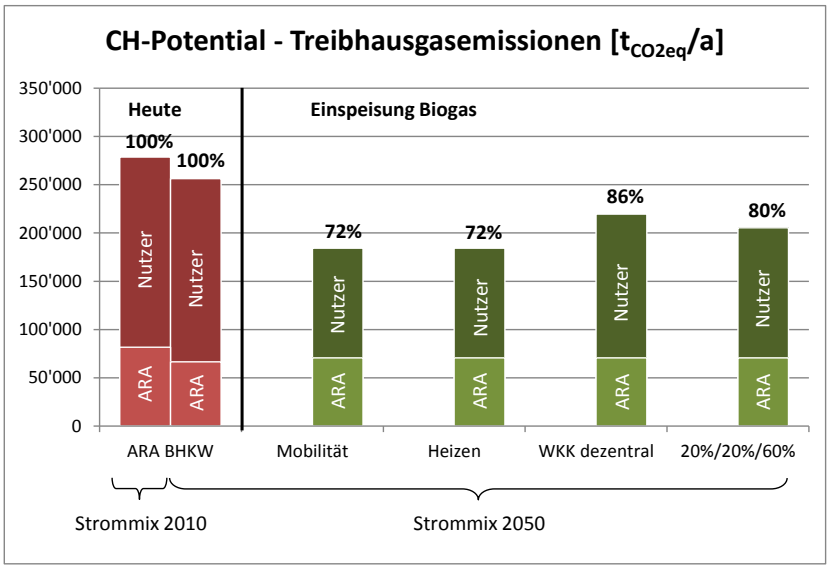


Abbildung 2:Vergleich Treibhausgasemissionen Ist-Zustand und Potential

Die Betrachtung der einzelnen Verwertungspfade sind rein theoretische Annahmen und sollen die Grenzen der Potentiale aufzeigen. Heute wird Biogas zu 36% im Mobilitätssektor, 63 % zum Heizen und nur 1% in WKK Anlagen eingesetzt.

In den Berechnungen wurde ein Verbrauchermix mit 20% Mobilität, 20% Heizen und 60% WKK aufgrund der Prämisse zur Bereitstellung von hochwertiger Energie als Referenz angenommen. Jegliche andere Verteilung ergibt keine grundsätzlich andere Ergebnisse.

CH-Potential

Heute werden in den betrachteten 99 ARA rund 2/3 der gesamten Klärgasmenge in BHKW verstromt. Rund 14% bzw. 10.8 Mio. Nm^3/a Biogas werden aufbereitet und ins Erdgasnetz eingespeist, dies entspricht einer Energiemenge von 68 GWh_{Hu}/a.

Das theoretische Potential für die Biogaseinspeisung liegt bei 63.6 Mio. Nm^3/a. Dies entspricht einer Steigerung von knapp 53 Mio. Nm^3/a bzw. einer Energiemenge von 333 GWh_{Hu}/a.

Die Veränderung im Strommix (Produktion CH) hat insofern einen Einfluss auf die Potentialermittlung, weil sowohl bei der Verstromung als auch bei der Einspeisung der erzeugte Klärgasstrom mit dem Primärenergie- bzw. Treibhausgasfaktor gewichtet wird. Bei zunehmenden Anteilen erneuerbaren Stroms im Produktionsmix sinkt der Primärenergiefaktor. Die Sensitivität bezüglich Strommix wurde in den nachstehenden Betrachtungen ebenfalls mit berücksichtigt.

Die Auswirkungen einer Realisierung des ermittelten Potentials der 99 untersuchten ARA bezüglich Energie und Treibhausgasen sind im Anhang 10.12 detailliert aufgeführt.

Im Vergleich zur heutigen Nutzung des Klärgases kann der Primärenergiebedarf mit der Biogaseinspeisung um 10% (Strommix CH 2010) bzw. um 14% (Strommix

CH 2050) reduziert werden. Bezüglich Treibhausgasemissionen resultiert ein Reduktion von 18% (Strommix CH 2010) bzw. 20% (Strommix CH 2050).

Beurteilung

Die Nutzung des auf einer ARA anfallenden Klärgases in einem BHKW vor Ort zur Bereitstellung eines möglichst hohen Anteils des Eigenbedarfs an Strom und Wärme ist heute als ökologisch und energietechnisch sinnvoller Standard etabliert.

Weitet man die Betrachtung von der ARA auf eine mögliche ARA-externe Nutzung der Energie des Klärgases aus, ist aus der Perspektive der effizienten Energienutzung und des Klimaschutzes die Einspeisung gegenüber einem BHKW auf der Anlage vorteilhafter. Ein Grund dürfte darin liegen, dass die BHKW-Abwärme nicht vollständig genutzt werden kann und wegen dem BHKW Wärmeüberschuss die ARA interne Wärmerückgewinnung aus vorhandenen Abwärmequellen (Faulschlamm, Kompressoren, etc.) keinen Sinn macht.

Bei einer Einspeisung ist es möglich, die Energie des Klärgases und insbesondere die Wärme weitgehend zu nutzen, so zum Beispiel dezentral zur Verstromung in dezentralen WKK-Anlagen oder direkt zum Heizen. Zudem kann das eingespeiste Biogas auch in der Mobilität eingesetzt werden.

Die dezentrale Verstromung von eingespeistem Klärgas kann in verschiedenen WKK Anwendungen (GuD-Prozessen, BHKW, Mikrogasturbinen, Stirlingmotor, etc.) wärmegeführt erfolgen. In der Studie wird ob zentral oder dezentral nur die BHKW-Anwendung betrachtet. Die Sensitivitäten bezüglich dem Wärmenutzungsgrad wurden sowohl bei der Verstromung als auch bei der Einspeisung berechnet. Insbesondere bei kleinen WKK Anlagen wird eine wärmegeführte Betriebsweise vorausgesetzt.

Fazit und Ausblick

Die ganzheitliche Betrachtung mit Einbezug der dezentralen Nutzung eröffnet damit energetische und ökologische Potentiale, die es auch aus wirtschaftlichen Überlegungen zu nutzen gilt. Denn die Biogaseinspeisung lohnt sich, sowohl für den ARA Betreiber, als auch für den Einspeiser bzw. Gasabnehmer. Die Wirtschaftlichkeit (finanziell gleichwertige Lösung für ARA) der Gaseinspeisung liegt bei Anlagen mit KEV Entschädigung im Mittel bei 7.5 Rp/kWh$_{Ho}$ inkl. ökologischem Mehrwert (Gas+Biogas-Zertifikat). Bei Anlagen ohne KEV liegt dieser Wert unter 4.0 Rp/kWh$_{Ho}$. Mit der KEV Entschädigung wird der Beschaffungspreis für erneuerbares Gase angehoben. Die Gaswirtschaft fragt zunehmend nach erneuerbarem Gas nach bzw. unterstützt die Bestrebungen zur Biogaseinspeisung mit einem eigenen Förderfonds[1]. Durch die KEV und neu über Investitionsbeiträge (EnG Art. 28 Abs. c) soll die Verstromung in der ARA weiterhin gefördert werden.

In Bezug auf die aufgezeigten Einsparpotentiale empfehlen wir, die Rahmenbedingungen für die Einspeisung und dezentrale Verstromung von erneuerbarem Gas (EnV, Anhang 1.5) zu überprüfen.

[1] www.erdgas.ch/biogas/foerderung-der-biogas-einspeisung/

Eng verknüpft mit der Biogaseinspeisung ist eine ARA interne Nutzung von Abwärmequellen mittels Prozess-Wärmerückgewinnung (WRG) und die Nutzung der im Abwasser enthaltenen Energie zur Deckung des ARA-eigenen Wärmebedarfs. Nutzt man bereits Abwasserwärme auf der ARA ist es naheliegend, dass das grosse ungenutzte Abwärmepotential auch für ARA-externe Bezüger nutzbar gemacht und mittels eines Wärme- bzw. Anergienetzes an diese verteilt wird. Biogaseinspeisung und ARA-interne und –externe Abwasserwärmenutzung ergänzen sich also energietechnisch optimal.

Zu ähnlichen Schlussfolgerungen ist das Amt für Wasser und Abfall (AWA) des Kantons Bern gekommen. In seiner Studie und Bericht vom März 2015 wird folgende Aussage gemacht:

„Werden die Massnahmen der vollständigen und effizienten Klärgasnutzung konsequent umgesetzt, wird dies zu einer Verschiebung von der heute verbreiteten Verstromung zur Biogasaufbereitung und – einspeisung führen“

Einen weiterer Schritt in Richtung gesamtheitlich integrierte und optimierte Energiesysteme stellt die Technologie Power-to-gas[2] dar. Diese Technologie steht noch in der Entwicklungsphase. Doch es gibt im Ausland erste industrielle Anlagen, welche das CO_2 aus dem Klärgas mittels Zufuhr von Wasserstoff (H_2) zu synthetischem Methan bzw. erneuerbarem Gas umwandeln können. In der Schweiz wurde die erste Power-to-Gas Anlage von der Regio Energie Solothurn als Leuchtturmprojekt des BFE kürzlich in Betrieb genommen.

Mit der direkten Verbrennung und Verstromung von Klärgas ist die Nutzung des CO_2 aus dem Abgas nur mit hohem technischem Aufwand möglich.

Swisspower Masterplan 2050

Swisspower strebt langfristig die Versorgung der Schweiz mit erneuerbarer Energie an. Swisspower setzt dieses Ziel schrittweise und glaubwürdig anhand eines Masterplans um. Die Umsetzung erfolgt mittels konsequenter Anwendung von Energieeffizienz-Massnahmen sowie unter Einbezug eigener Produktionsanlagen und deren intelligente Vernetzung.

Die effiziente Verwertung von Klärgas aus den Schweizer ARA, Gewinnung von erneuerbarem Gas und die Reduktion von CO_2-Emissionen misst Swisspower eine hohe Bedeutung zu. Zudem bewirken diese Massnahmen einen wesentlichen Beitrag zu den Zielen der Energiestrategie des Bundes und des Klimaschutzes.

Netzkonvergenz

Die Entwicklungen in der Strom- und Gaswirtschaft können nicht mehr isoliert betrachtet werden. Durch die Energiewende soll die Stromerzeugung in der Schweiz weitestgehend auf erneuerbare Energien umgestellt werden. Dafür muss die Systemstabilität und Systemsicherheit auf eine breitere Basis als bisher gestellt werden. Strom und Gasnetze wachsen stärker zusammen und gegensei-

[2] www.iet.hsr.ch/Power-to-Gas

tige Beeinflussungen, Abhängigkeiten und vor allem Potentiale nehmen zu. Somit geraten auch Erdgas und erneuerbare Gase als flexibler Energieträger in der Stromerzeugung zunehmend in den Fokus.

2 Einleitung

Gegenüberstellung Einspeisung / Verstromung

Die Einspeisung von aufbereitetem Klärgas ins Erdgasnetz verspricht energetisch sinnvoller, klimafreundlicher und auch wirtschaftlicher zu sein als die heute vielerorts übliche Verstromung des Klärgases in einem BHKW in der ARA und zwar aus folgenden Gründen:

- Die Aufbereitungstechnologie ist heute Stand der Technik und wird standardmässig von mehreren Lieferanten im Markt angeboten. Die Betriebssicherheit ist vergleichbar hoch. Die Methanemissionen wurden sowohl beim Gasmotor als auch bei der Aufbereitung eingerechnet.
- Das Klärgas kann zu mehr als 90% (Sommer/Winter) ohne Wärmeverluste genutzt werden. Mit Co-Substraten ist eine weitere Steigerung der Klärgasproduktion möglich, ohne dabei zusätzliche Abwärme zu produzieren.
- Hohe BHKW Stromgestehungskosten zwischen 15-55 Rp/kWh$_{el}$ (BFE Studie v. 22. Mai 2007)
- Sofern keine andere Quelle (KVA, etc.) zur Verfügung steht, kann die bisher meist ungenutzte Abwasserwärme oder Prozess Abwärme (WRG) als Ersatz für die wegfallende BHKW-Wärme genutzt werden. Dies ermöglicht auch ARA- externe Verbraucher anzuschliessen und zu wirtschaftlichen interessanten Bedingungen mit Wärme zu versorgen. Mit der ARA-Abwasserwärmenutzung wird ein hohes Potential an CO_2-Reduktion wirtschaftlich nutzbar gemacht
- Durch die dezentrale Nutzung des eingespeisten Klärgases in WKK Anlagen, kann hochwertige Energie bei gleichzeitiger Steigerung der Effizienz erzeugt werden (wärmegeführte Anlagen möglich, Erdgas BHKW höherer Wirkungsgrad, etc.)
- Das eingespeiste Klärgas im Netz kann auch für Treibstoff und Heizwärme genutzt werden

Dem stehen folgende Vorteile der Verstromung in ARA-BHKW gegenüber:

- Bei der direkten Klärgasverstromung kann mehr Strom produziert und der Eigenstromverbrauch tief gehalten werden
- Die Verwendung zum Heizen und für Treibstoff führt zu einer Reduktion erneuerbarer Stromproduktion
- Die ARA-Abwärme kann auch ohne Biogaseinspeisung genutzt werden
- Die Verstromung im BHKW auf der ARA ist ein langjährig etabliertes Konzept auf einer Vielzahl von ARA

Auftrag

Die vorliegende Studie untersucht und diskutiert folgende Aspekte:

- Vergleich Gaseinspeisung und BHKW Nutzung bei der ARA:
  - Energieflüsse
  - Energie- und Treibhausgasbilanzen
- Hochrechnung des Schweizerischen Potentials für ARA mit der Möglichkeit

einer Einspeisung in das Erdgasnetz

- Die Eckwerte von bestehenden ARA Standorten (Klärschlammmengen, EWG etc.) fliessen unverändert in die Berechnungen ein

Abgrenzungen

Allfällige Optimierungspotentiale z.B. aus Standortzusammenlegungen oder Optimierungen in der Klärschlammwirtschaft sind nicht Gegenstand der vorliegenden Studie.

Ebenso wenig wird eine Steigerung der Klärgasproduktion aufgrund von neuen, zusätzlichen flüssigen Co-Substraten berücksichtigt.

Weitere Kriterien, wie z.B. Versorgungssicherheit auf ARA, (energie-)politische Durchführbarkeit werden im Rahmen der vorliegenden Studie nicht im Detail behandelt.

Verhältnis Wärmeproduktion zu Wärmeeigenbedarf ARA

Aufgrund von verschiedenen Datenanalysen aus Ist-Werten verschiedener ARA muss man davon ausgehen, dass die Wärmeproduktion aus dem BHKW in den meisten Fällen den ARA Wärmeigenbedarf um ein Vielfaches übersteigt. Insbesondere im Sommer ist ein enormer Wärmeüberschuss vorhanden.

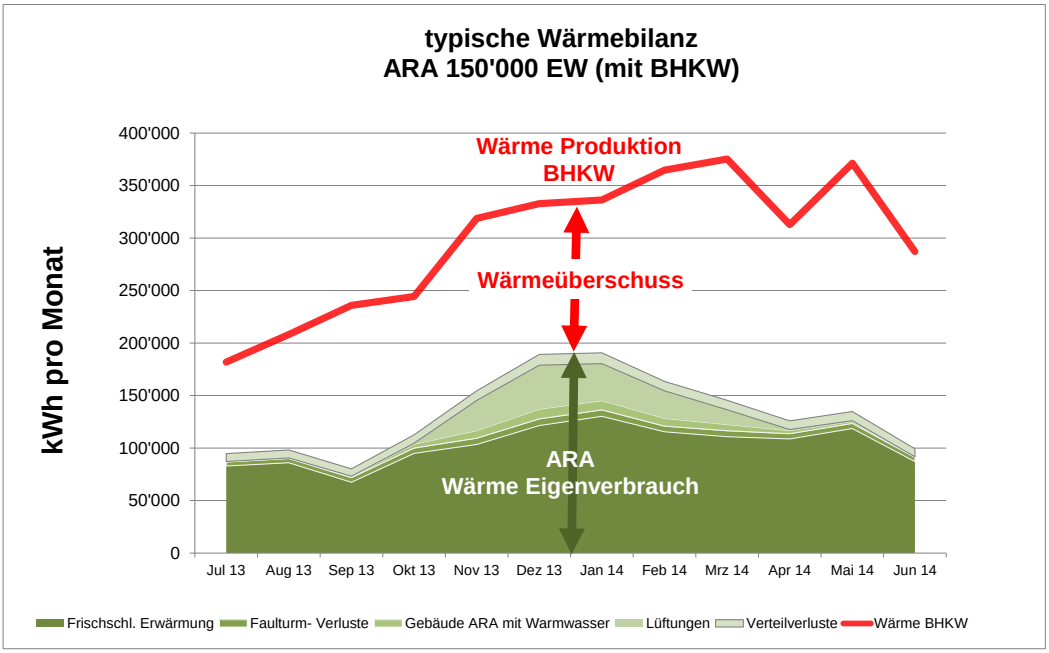


Abbildung 3: Vergleich ARA Wärmebedarf und Wärmeproduktion mit BHKW

Der effektive Nutzungsgrad (Strom+Wärme) bei einer energetisch optimierten Anlage liegt wie oben dargestellt bei rund 60%. Dieser Umstand wird mit entsprechenden Sensitivitätsanalysen (siehe Abbildung 36) in der Studie Rechnung getragen.

Der Wärmeeigenbedarf der ARA ist gegeben (fix). Eine Steigerung des Wärmenutzungsgrades des BHKW ist also nur dann möglich, wenn der Wärmeüber-

schuss in ein externes Wärmenetz abgegeben werden kann.

Steigerung der Energieeffizienz

Als übergeordnete Rahmenbedingung wird die Steigerung der Energieeffizienz angestrebt. Dabei steht nicht die exergetische Nutzung oder eben die Maximierung der Stromproduktion aus dem Klärgas im Fokus, sondern die energetisch maximale Energiegewinnung (Strom, Wärme, Treibstoff) und Ausnutzung hoher CO_2-Reduktionspotentialen.

Dass die ARA bezüglich Stromproduktion nicht am effizientesten sind, zeigen die Ergebnisse der BAFU Studie „Energieeffizienz und Energieproduktion auf ARA". Darin sind die effektiven Nutzungsgrade der Klärgasverstromung aufgeführt:

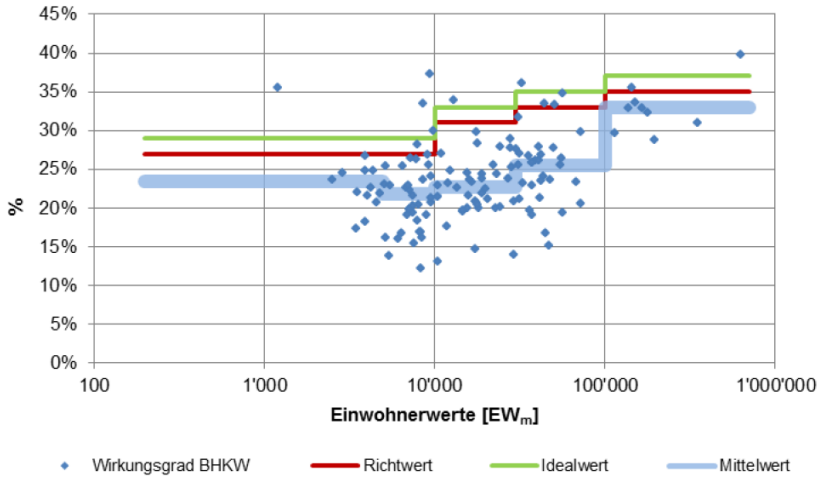


Abbildung 4:Ist-Werte Stromnutzungsgrad ARA-BHKW (Quelle [4])

Der elektrische Stromnutzungsgrad der meisten ARA bewegt sich demnach zwischen 20-25%. Gegenüber den technischen Wirkungsgraden bei Normbedingungen von rund 40% sind diese Praxiswerte eher tief. Die Gründe sind vielfach auf nicht optimale Betriebsweise (hoher Teillastanteil bzw. falsche Auslegung der Gasmotoren) zurückzuführen.

Wärmerückgewinnung aus ARA Prozessen

In der gleichen Studie wird das Potenzial von Prozess-Wärmerückgewinnungen bei ARA mit Einspeisung nachgewiesen. Die Wärmerückgewinnung aus

- Frischschlammvorwärmung
- Kompressionswärme (Schlammbelüftung)
- Prozessabluft
- Gasaufbereitung

vermag rund 80% des Wärmeeigenbedarfs abzudecken. Solange ein BHKW in der ARA Wärmeüberschüsse produziert, werden diese Potentiale nicht oder nur teilweise genutzt. Die Temperaturniveaus der WRG Quellen liegen zwischen 40-80°C. Der Wärmebedarf einer ARA erfordert maximal 60°C. Deshalb sind diese WRG Quellen ohne grossen Aufwand bzw. Temperaturhub mit einer Wärmepumpe zu bewerkstelligen.

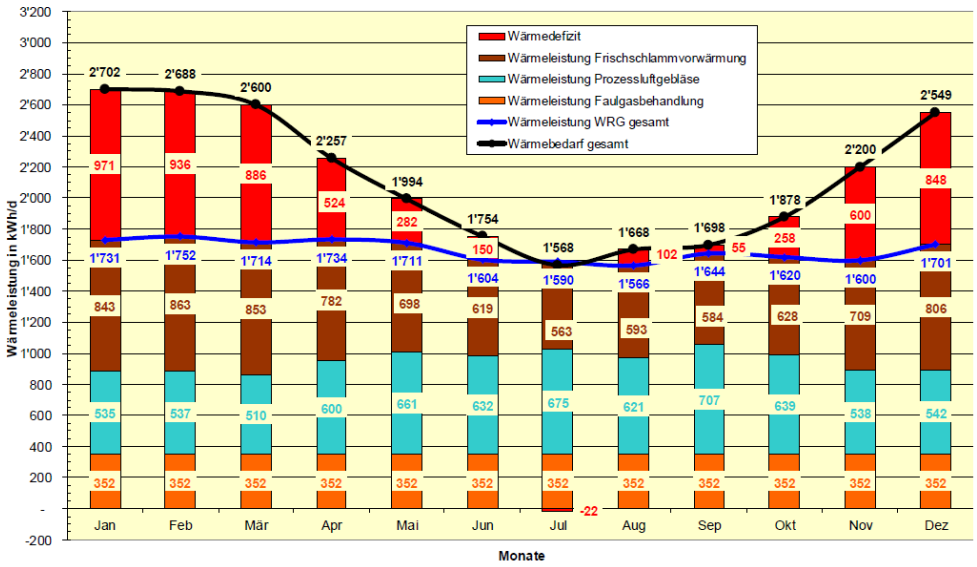


Abbildung 5: Potential Prozess-Wärmerückgewinnung auf ARA mit Einspeisung (Quelle [4])

Zielsetzung

Die vorliegende Studie soll die Thematik „Klärgasnutzung" aus verschiedenen Betrachtungswinkeln beleuchten. Namentlich stehen die sich teilweise widersprechenden Sichtweisen aus der Perspektive Energie und Treibhausgas im Vordergrund. Ziel der Studie ist eine gesamtheitliche Sicht und Beurteilung mit Empfehlungen für die Verwertung des auf der ARA erzeugten Klärgases.

Grundlagen

Als Grundlagen für die Studie dienen:

[1] Begleitgruppensitzungen vom 03.11.2014, 03.02.2015 und 20.04.2015 bei der Organisation Kommunale Infrastruktur (OKI) in Bern

[2] Besprechung mit Herren U. Nyffenegger (Amt für Umweltkoordination und Energie Kanton Bern) und J. Suter (AWA Bern) vom 31.03.2015

[3] Bericht Energie in ARA – Leitfaden zur Energieoptimierung auf Abwasseranlagen; Holinger AG, November 2008

[4] Bericht Energieeffizienz und Energieproduktion auf ARA; Holinger AG im Auftrag des BAFU, November 2012

[5] Bericht Energiegrundsätze für die ARA im Kanton Bern; AWA Amt für Wasser und Abfall Bern, März 2015

[6] Bericht Primärenergiefaktoren von Energiesystemen, Version 2.2 vom Juli 2012 von ESU-Services

[7] Botschaft zum ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050 (Revision des Energierechts) und zur Volksinitiative „Für den geordneten Ausstieg aus der Atomenergie (Atomausstiegsinitiative)" vom 4. September 2013

[8] Diverse Daten von und Besprechungen mit Firma Holinger AG

[9] Emissions- und Leistungsverhalten von Biogasverbrennungsmotoren in Abhängigkeit von der Motorwartung, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2006

3 Methodik

3.1 Grundlagen und Systemgrenzen

Systemgrenzen und Grundlagen

Die Systemgrenzen werden um den ARA-Prozess sowie um die modellierten Endnutzer gelegt. Endnutzer sind z.B. Haushalte, dezentrale Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen, Tankstellen, etc. in welchen die auf der ARA erzeugte Energie (z.B. Strom aus BHKW, Abwärme, Klärgas, aufbereitetes Biomethan, etc.) genutzt werden kann.

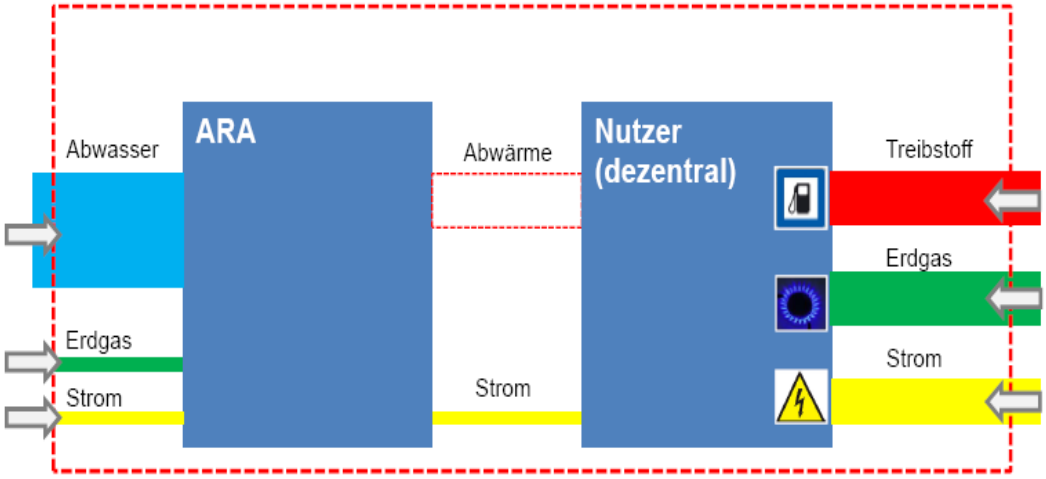


Abbildung 6: Betrachtetes Gesamtsystem (äussere Systemgrenze) mit ARA und Endnutzer dezentral

Die produzierte Menge an Klärgas ist dabei – unabhängig vom modellierten Endnutzer - stets dieselbe, der ARA-Prozess muss jedoch zwecks möglicher Wärmerückgewinnung sowie zwecks Wärmenutzung im ARA-Prozess im System eingeschlossen sein.

Für die Biogasaufbereitung und –einspeisung wird die Membrantechnologie angenommen, da im ARA-Leistungsbereich von 35 m^3/h bis 100 m^3/h die meisten betrachteten Anlagen liegen und diese Technologie in dieser Grössenordnung vor allem betriebliche Vorteile hat. Die Unterschiede zu Aminwäsche resp. Druckwechseladsorption hinsichtlich Auswirkungen auf die Energie- und Treibhausbilanzen sind im Rahmen der vorliegenden Studie vernachlässigbar klein.

ARA

Auf der Seite der ARA werden folgende Energieflüsse betrachtet:

- Strombedarf und Stromproduktion
- Wärmeproduktion (inkl. WRG) und Wärmeeinkauf
- Brennstoffbedarf (Erdgas, Heizöl und Alternativbrennstoffe)
- Thermische und chemische Energie im Abwasser

Von der thermischen Energie im Abwasser (Anergie) wird nicht der gesamte Energieinhalt dargestellt. Nur der effektiv nutzbare Energieanteil (abhängig vom Wärmebedarf auf der ARA und einem allfällig vorhandenen Fernwärmenetz) wird in der Energiebilanz aufgeführt.

Auch von der chemisch gespeicherten Energie im Abwasser wird nur derjenige Anteil dargestellt, welcher in Klärgas umgewandelt werden kann. Der restliche Energieinhalt im Klärschlamm (z.B. je nach ARA also Faul-, Frisch- oder Trockenklärschlamm), welcher die Systemgrenze ARA verlässt (z.B. Verbrennung in KVA, Zementwerk oder Monoverbrennung) wird in der Betrachtung nicht berücksichtigt. Einzige Ausnahme bilden dabei die ARA, welche eine interne Klärschlammverbrennung betreiben (ARA Lausanne, ARA ProRheno Basel und ARA Rhein Pratteln). Der Grund für diese Betrachtungsweise ist die Annahme, dass der Klärschlamm auf die gleiche Art genutzt wird wie heute, unabhängig von der Nutzung des Klärgases.

Aufgrund der mangelnden Kenntnis über die Art und Menge der zugeführten Co-Substrate werden diese nicht separat dargestellt. Der Energieinhalt der Co-Substrate ist im Klärgas bereits enthalten. Auf der Inputseite werden die Co-Substrate, wenn vorhanden, zusammen mit dem Abwasserstrom dargestellt.

Bei den vorliegenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass die Klärschlamm- und Co-Substratmengen und -flüsse unverändert, wie aufgrund der Vergangenheitsdaten ermittelt, bleiben. Der Einfluss von veränderten oder optimierten Klärschlamm- und Co-Substratflüssen wird in der vorliegenden Studie also bewusst nicht betrachtet. Es ist davon auszugehen, dass die Zugabe von Co-Substraten (direkt in den Faulturm) und der damit verbundenen Steigerung der Gasproduktion die Ergebnisse bei der Einspeisung zusätzlich verbessern, weil bei der Verstromung die ungenutzten Wärmemengen noch grösser werden.

Nutzer dezentral (Definition Nutzerprofil)

Um die Einflüsse der Nutzung des Biogases bei den dezentralen Nutzern aufzuzeigen, werden verschiedene Nutzungsarten untersucht und dargestellt. Die Modellierung der Endnutzer erfolgt deshalb nach drei verschiedenen Nutzungsarten, d.h. Formen von Endenergie:

- Treibstoff
- Wärme
- Strom (über Verstromung Biomethan in dezentralen BHKW)

Der Jahresenergiebedarf wird berechnet, indem 100% des eingespeisten Biomethans aus dem Erdgasnetz in der jeweiligen Form (Mobilität, Heizen, WKK) eingesetzt wird. Die jeweiligen Wirkungsgrade und Verluste werden nach heutigem Stand der Technik berücksichtigt.. Dadurch ergibt sich auf der Nutzerseite eine Systemgrösse, welche sowohl bei der Verstromung als auch bei der Einspeisung als Energieinput gleich hoch bleibt. Differenzen zu dieser Systemgrösse werden je nach Energiezufluss ins Nutzersystem über die äussere Systemgrenze ausgeglichen.

Auf der Nutzerseite werden unterschiedliche Varianten gerechnet, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Die Varianten dienen dabei rein dem Zweck der Vergleichbarkeit (welche Energiewerte und Treibhausgasemissionen ergibt die gleiche Klärgasmenge bei unterschiedlicher Nutzung). Es werden damit keine Aussagen über die energiepolitisch oder wirtschaftlich sinnvollsten Varianten ge-

macht.

Nachfolgend wird die Definition der Nutzerprofile erläutert. Die entsprechenden Energieflussdiagramme sind in den folgenden Abbildungen dargestellt:

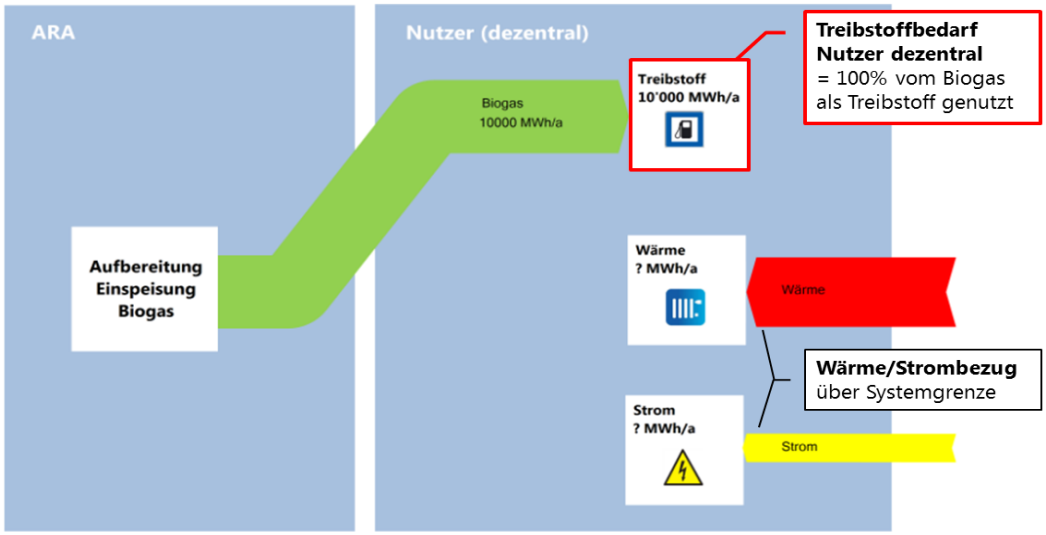


Abbildung 7: Energieflussdiagramm – Nutzung als Treibstoff

Der Treibstoffbedarf des Nutzers wird bestimmt, in dem das gesamte Biomethan dezentral als Treibstoff genutzt wird (Abbildung 7). Der fehlende Wärme- und Strombedarf wird über die Systemgrenze von aussen bezogen.

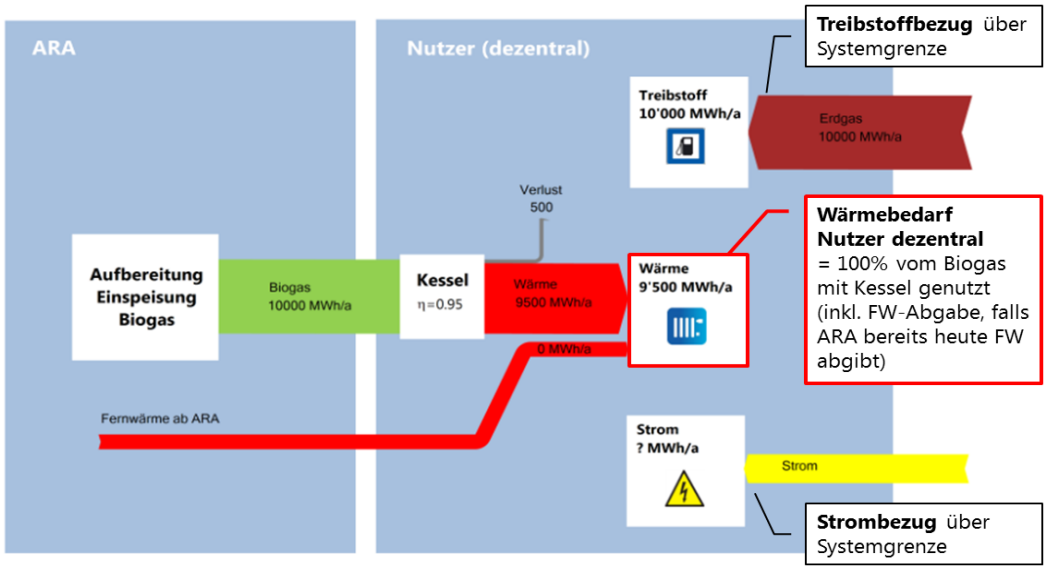


Abbildung 8: Energieflussdiagramm – Nutzung zur Wärmeerzeugung

Die Bestimmung des Wärmebedarfs ist in Abbildung 8 ersichtlich. Das gesamte Biomethan wird in einer dezentralen Kesselanlage genutzt. Falls die ARA bereits heute zusätzlich Wärme an ein bestehendes Fernwärmenetz abgibt, wird diese Wärmeenergie zum Bedarf des Nutzers addiert. Der fehlende Treibstoff- und Strombedarf muss über die Systemgrenze von aussen bezogen werden.

Es werden nur bestehende Fernwärmenetze betrachtet. Das Potential beim Bau von neu erstellten Fernwärmenetzen (oder dem Ausbau von bestehenden Netzen) wird nicht aufgezeigt bzw. berücksichtigt.

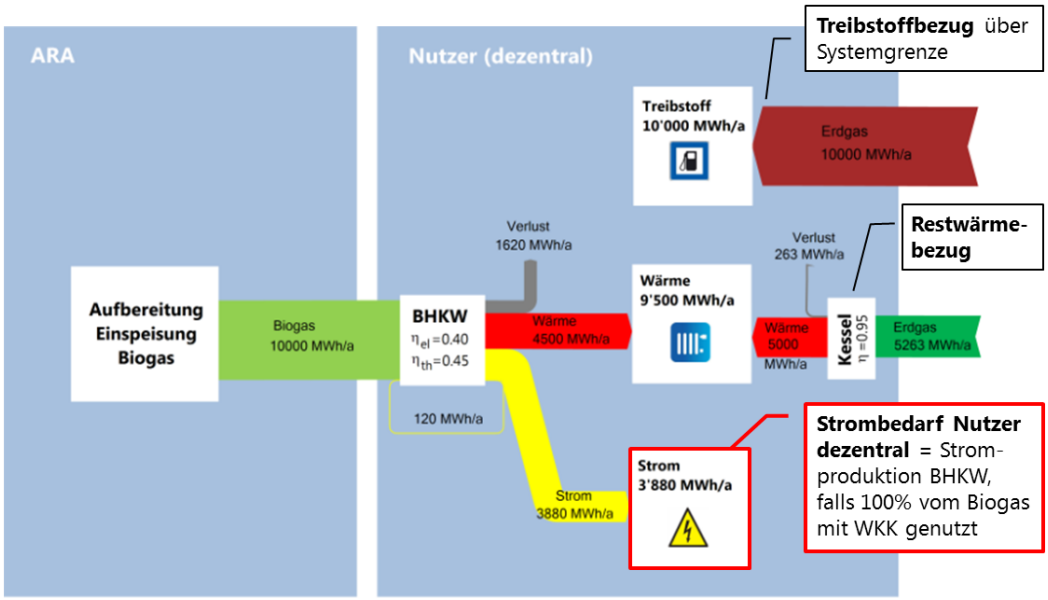


Abbildung 9: Energieflussdiagramm – Nutzung in dezentralen BHKW

Für die Definition des nutzerseitigen Strombedarfs wird angenommen, dass das gesamte Biomethan in dezentralen WKK-Anlagen genutzt wird (siehe Abbildung 9). Die dabei anfallende Abwärme kann vollständig für die Heizung genutzt werden. Der fehlende Wärme- und Treibstoffbedarf wird über die Systemgrenze bezogen.

Zusätzlich zu den beschriebenen Grundvarianten (Extremvarianten) wird eine gemischte Nutzung definiert (Abbildung 10). Dabei wird angenommen, dass das auf der ARA erzeugte und ins Erdgasnetz eingespeiste Biomethan zu 20% als Treibstoff, zu 20% für die Heizung und zu 60% in dezentralen BHKW genutzt wird. Der jeweils fehlende Energiebedarf muss über die Systemgrenze bezogen werden. Die Verteilung von 20%/20%/60% bei dieser Variante ist eine Annahme. Der erhöhte Anteil von 60% für die BHKW-Nutzung wird aufgrund der Energiestrategie des Bundes gewählt, welche eine möglichst hohe Stromproduktion aus erneuerbaren Energien anstrebt. Jede Mischvariante liegt jedoch unter den Extremwerten gegenüber den 100%-Nutzerprofilen (Mobilität, Heizen und WKK).

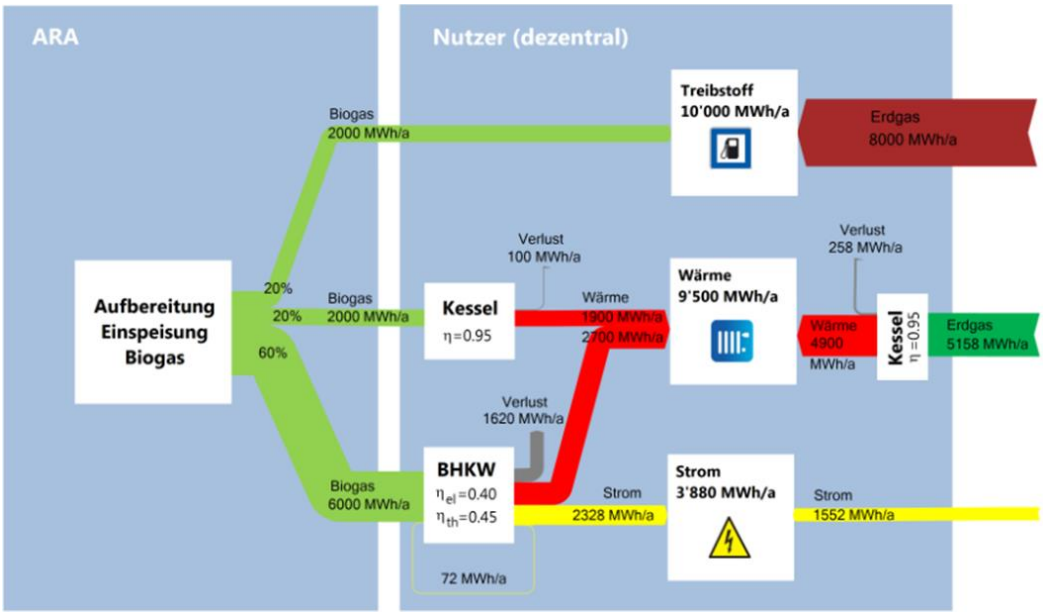


Abbildung 10: Energieflussdiagramm – Mischnutzung 20%/20%/60%

Vergleich ARA-BHKW und Biogaseinspeisung

Mit dem definierten Nutzerprofil wird die Biogaseinspeisung mit dem ARA-BHKW verglichen. Sowohl für das ARA-BHKW, als auch für die Biogaseinspeisung wird dasselbe Nutzerprofil verwendet.

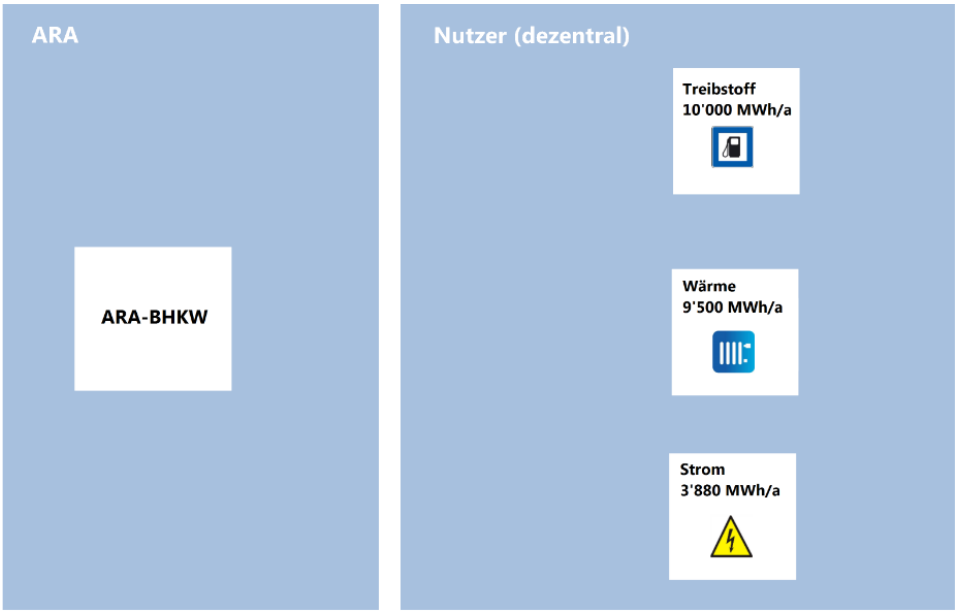


Abbildung 11: Nutzerprofil ARA-BHKW

In der Abbildung 11 werden bewusst keine Energieflüsse dargestellt, da die BHKW-Outputs (Strom und Wärme) auf den einzelnen ARA unterschiedlich genutzt werden. Der produzierte BHKW-Strom kann z.B. zur Deckung des ARA-Eigenstrombedarfs genutzt werden, oder als KEV-Strom verkauft und dem Nutzer zugeführt werden.

3.2 Randbedingungen und Umrechnungsfaktoren

Energetische Randbedingungen

Im Berechnungsmodell werden die folgenden energetischen Randbedingungen für die verschiedenen Anlagen verwendet.

- Nutzungsgrad Gaskessel 95% bzgl. H_u
- Nutzungsgrad BHKW (Strom)[3] 40% bzgl. H_u und Generatorklemme (abzgl. Eigenstrombedarf)
- Nutzungsgrad BHKW (Wärme)[3] 45% bzgl. H_u
- Jahresarbeitszahl Abwasser-WP[4] 3.0
- Eigenstrombedarf BHKW 3% der Brutto-Stromproduktion
- Eigenstrombedarf Erdgaskessel 3% der Wärmeproduktion
- Methanschlupf Biogasaufbereitung 0.8% (Membrantechnologie)
- Methanschlupf BHKW (Quelle [9]) 0.5% (Literaturwerte bis 1.7%)

Primärenergiefaktoren

Die Primärenergiefaktoren stellen den Energieaufwand in der gesamten Prozesskette dar - von der Gewinnung der Rohstoffe über die Produktion in den Anlagen bis hin zum Endverbraucher -, welcher erbracht werden muss, um die Endenergie an der Systemgrenze, also z.B. vor dem Heizkessel, zur Verfügung stellen zu können (inkl. graue Energie).

Die Faktoren werden in der Einheit MJ_{eq}/MJ dargestellt. Der Index eq steht für „äquivalent", so werden die unterschiedlichen Formen an verbrauchter Endenergie auf dieselbe Basis, d.h. Primärenergie gebracht.

- Abwasserwärme[5] 0.00 MJ_{eq}/MJ
- Erdgas (Brennstoff) 1.12 MJ_{eq}/MJ
- Erdgas (Treibstoff) 1.18 MJ_{eq}/MJ
- Heizöl EL und Alternativbrennstoffe[6] 1.24 MJ_{eq}/MJ
- Wärmeeinkauf (Fernwärme ab KVA) 0.81 MJ_{eq}/MJ

[3] Je nach Fabrikat und Anlagengrösse reichen die elektrischen Wirkungsgrade von BHKW-Anlagen von 30% bis gegen 45%. Bei einem Gesamtnutzungsgrad (Strom und Wärme) von 75% bis 85% resultieren thermische Wirkungsgrade von 30% bis maximal 50%.
Der angenommene elektrische Nutzungsgrad von 40% scheint für bestehende Anlagen eher hoch. Er wurde als gerundeter Mittelwert neu erstellter strom- und wärmegeführter Anlagen eingesetzt. Dieser Wert wird aber nur für die Potentialberechnung auf Seite des Nutzers verwendet. Für die ARA-BHKW werden reale, gemessen Werte verwendet.

[4] Bei einer Heiztemperatur von 70°C liegt die Jahresarbeitszahl von Abwasser-Wärmepumpen je nach Fabrikat, Anlagengrösse und Kältemittel zwischen 3.0 und 4.0. Für die Berechnungen wird ein tiefer Wert von 3.0 eingesetzt (konservative Annahme).

[5] Abwasserwärme wird mit 0 eingesetzt, da diese Wärme aufgrund der Abwasserentsorgung anfällt und zur energetischen Nutzung zur freien Verfügung steht.

[6] In der ARA Pratteln (Rhein AG) werden bei der Klärschlammverbrennung diverse Alternativbrennstoffe eingesetzt (Lösungsmittel, Heizöl schwer, etc.). Weil der Anteil und Heizwert der eingesetzten Alternativbrennstoffe unbekannt ist, werden die Faktoren von Heizöl EL verwendet.

- Solarwärmeproduktion[7] 1.24 MJ_{eq}/MJ
- Strommix CH 2010 2.65 MJ_{eq}/MJ
- Strommix CH 2050 1.64 MJ_{eq}/MJ

Die Primärenergie- und Treibhausgasfaktoren werden gemäss KBOB/ ESU-Service[8] verwendet (Basis Ökobilanzen ETH).

Für den Strommix CH 2010 wird der effektive Schweizer Produktionsmix verwendet. Beim Strommix CH 2050 wird ein Produktionsmix gemäss Botschaft zum ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050 des Bundes[9], Prognose Stromerzeugungsmix im 2050 gemäss Szenario NEP (Neue Energiepolitik), verwendet. Die Berechnung der Strommixfaktoren (Primärenergie und Treibhausgas) sind im Anhang 10.13 aufgezeigt.

In der vorliegenden Betrachtung schneidet das Klärgas/Biogas die festgelegten äussere Systemgrenzen nicht, weshalb es auch nicht in Primärenergie- und Treibhausgasfaktoren bewertet werden muss.

Treibhausgas-faktoren

Während die Primärenergiefaktoren die Endenergieverbräuche auf Äquivalente an Primärenergie „rückrechnen", bewerten die Treibhausgasfaktoren die Endenergien entsprechend ihren Treibhausgasemissionen. Dabei werden alle Treibhausgasemissionen von der Gewinnung der Rohstoffe, den Transport, über die Produktion in den Anlagen bis hin zum Endverbraucher mit eingerechnet.

Die Einheit der Treibhausgasfaktoren ist kg_{CO2eq}/MJ (Quelle KBOB/ESU-Service[8]). Dadurch werden die verschiedenen Formen von Endenergie hinsichtlich ihrer Treibhausgas-Emissionen auf der Basis von CO_2-Äquivalenten vergleichbar.

- Abwasserwärme[10] 0.000 kg_{CO2eq}/MJ
- Erdgas (Brennstoff und Treibstoff) 0.066 kg_{CO2eq}/MJ
- Heizöl EL und Alternativbrennstoffe 0.083 kg_{CO2eq}/MJ
- Wärmeeinkauf (Fernwärme ab KVA) 0.045 kg_{CO2eq}/MJ
- Solarwärmeproduktion[11] 0.005 kg_{CO2eq}/MJ
- Strommix CH 2010 0.045 kg_{CO2eq}/MJ
- Strommix CH 2050 0.028 kg_{CO2eq}/MJ
- Methanschlupf 25 kg_{CO2eq}/kg_{CH4}

Beim BHKW entsteht durch unvollständige Verbrennung des Klärgases ein Me-

[7] Primärenergiefaktor für solare Warmwassererzeugung in Mehrfamilienhäusern.
[8] Bericht Primärenergiefaktoren von Energiesystemen, Version 2.2 vom Juli 2012 von ESU-Services, Tabelle 1.1 auf Seite 3.
[9] Botschaft zum ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050 (Revision des Energierechts) und zur Volksinitiative „Für den geordneten Ausstieg aus der Atomenergie (Atomausstiegsinitiative)" vom 4. September 2013.
[10] Abwasserwärme wird mit 0 eingesetzt, da diese Wärme aufgrund der Abwasserentsorgung anfällt und zur energetischen Nutzung zur freien Verfügung steht.
[11] Primärenergiefaktor für solare Warmwassererzeugung in Mehrfamilienhäusern.

thanschlupf. Auch bei der Biogasaufbereitung wird eine Methan-Emission im CO_2-Abgasstrom berücksichtigt. Rechnerisch werden CH_4-Emissionen mit einem Faktor 25 im Vergleich zu CO_2 berücksichtigt. Der Methanschlupf bei der Klärgasproduktion (z.B. Undichtheiten Fermenter, etc.) wird nicht berücksichtigt, da dieser bei allen betrachteten Varianten gleich hoch ist.

Die in den Anlagen enthaltene graue Energie und grauen Treibhausgasemissionen auf der ARA und bei den Nutzern werden vernachlässigt (z.B. Bau ARA, BHKW, Kessel etc.). Es wird davon ausgegangen, dass diese Einflüsse bei den untersuchten Varianten vergleichbar hoch sind und deshalb in der Beurteilung, die auf die Differenzen zwischen den Varianten abstellt, vernachlässigt werden können. Zudem sind entsprechende Daten schwierig verfügbar.

Datenbasis

Bei den nachfolgenden Ausgangswerten die zur rechnerischen Bilanzierung verwendet wurden, handelt es sich um IST-Daten, welche aus dem Leitsystem als Stunden-, Monats-, und Jahreswerte erfasst wurden. Die Daten wurden plausibilisiert. Es handelt sich dabei um normale Betriebszustände bzw. keine Extremwerte (Ausreisser).

Energiebedarf ARA

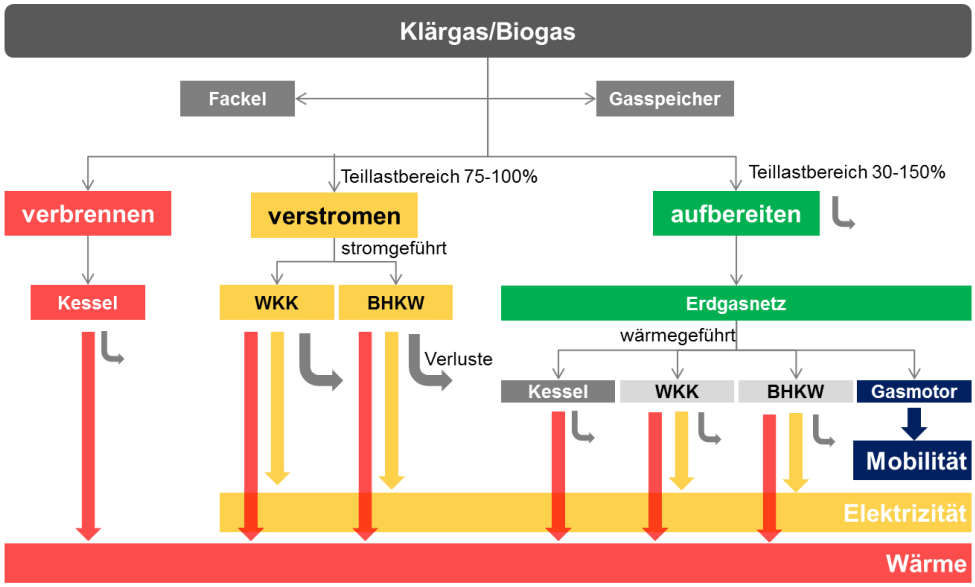
Mit der Umstellung von der Verstromung auf die Klärgasaufbereitung und Einspeisung steigt der Strombezug ab Netz. Dieser Bezug ab Netz wird mit den entsprechenden Primärenergie- und CO_2-Emissionsfaktoren gewichtet und fliesst vollständig in die Bilanzierung ein. Ebenso muss der Eigenwärmebedarf der ARA (Faulung, etc.) mit Einsatz von Primärenergien bereitgestellt werden. Auch dieser Energiefluss wird nachfolgend vollständig berücksichtigt.

4 Betrachtung einzelner typischer ARA auf Basis von IST-Daten

4.1 Einleitung

Nutzungsarten Klärgas/Biogas

In der nachfolgenden Abbildung sind die verschiedenen Nutzungsarten von Klärgas/Biogas dargestellt.



WKK: Wärme-Kraft-Kopplung (Micro-Gasturbine, GuD, etc.)

Abbildung 12: Mögliche Nutzungen Biogas

Es werden zentrale und dezentrale Nutzungsarten unterschieden.

Zentrale Nutzung

Bei der zentralen Nutzung wird das Klärgas direkt auf der ARA verwertet, z.B. zur Verbrennung in einem Gaskessel, zur Verstromung in einem BHKW oder eine gemischte Nutzung dieser beiden Varianten.

Dezentrale Nutzung

Damit das Klärgas dezentral nutzbar wird, muss es auf der ARA zuerst aufbereitet und ins Erdgasnetz eingespeist werden. Zur Verbrennung im Kessel oder BHKW, etc. kommt hier noch die Variante Treibstoffnutzung (Gasmotor/Mobilität) hinzu.

Vorgehen

In einem ersten Schritt (Kapitel 4) werden drei typische ARA detailliert betrachtet (basierend auf realen, gemessenen IST-Werten). Dabei wird die zentrale Klärgas-Nutzung auf der ARA mit der Biogaseinspeisung (dezentrale Nutzung) gemäss der einleitend beschriebenen Methodik (Definition Nutzerprofil im Kap. 3) verglichen. Erst dann kann bezüglich Primärenergieeinsatz und Treibhausgasemissionen jede Anlage für sich und den verschiedenen Nutzungsformen verglichen werden. Folgende drei ARA werden betrachtet:

- Anlage 1 (83'000 EW): 0.5 Mio. Nm^3/a Klärgas mit ARA-BHKW
- Anlage 2 (145'000 EW): 1.0 Mio. Nm^3/a Klärgas mit ARA-BHKW, interne

Prozess-WRG und externe Fernwärme und Abwasser-WP

- Anlage 3 (200'000 EW): 2.0 Mio. Nm^3/a Klärgas mit Klärschlammtrocknung und Abwasser-WP

In einem zweiten Schritt (Kapitel 5) wird dann das gesamtschweizerische Potential untersucht.

4.2 ARA 1 (83'000 EW)

4.2.1 Ist-Zustand

Beschreibung

Die Anlage 1 entspricht einer ARA mit rund 0.5 Mio. Nm^3/a Klärgasproduktion und Klärgasverbrennung im BHKW auf der ARA. Als Datengrundlage dienen reale, gemessene Werte (die Werte wurden verifiziert und stellen keine Mittelwerte bzw. Aussreisserjahre dar). Das aus dem Klärschlamm gewonnene Klärgas wird dabei vollständig im BHKW verbrannt, die gewonnene Wärme wird soweit ein Bedarf besteht in der ARA genutzt, überschüssige Abwärme wird über Rückkühlung an die Umwelt abgegeben. Überschüssiger Strom ab BHKW wird ins Netz eingespeist. Reicht die Stromproduktion ab BHKW nicht, um den Eigenbedarf der ARA zu decken, wird Strom aus dem Netz bezogen. Reicht die produzierte Wärme nicht, um den Eigenbedarf zu decken, wird Erdgas aus dem Gasnetz bezogen.

In der Abbildung 13 ist die Referenzsituation (Stand heute) in einem Energieflussdiagramm dargestellt. Eine grössere Darstellung des Diagramms befindet sich im Anhang 10.1.

Energiefluss-diagramm

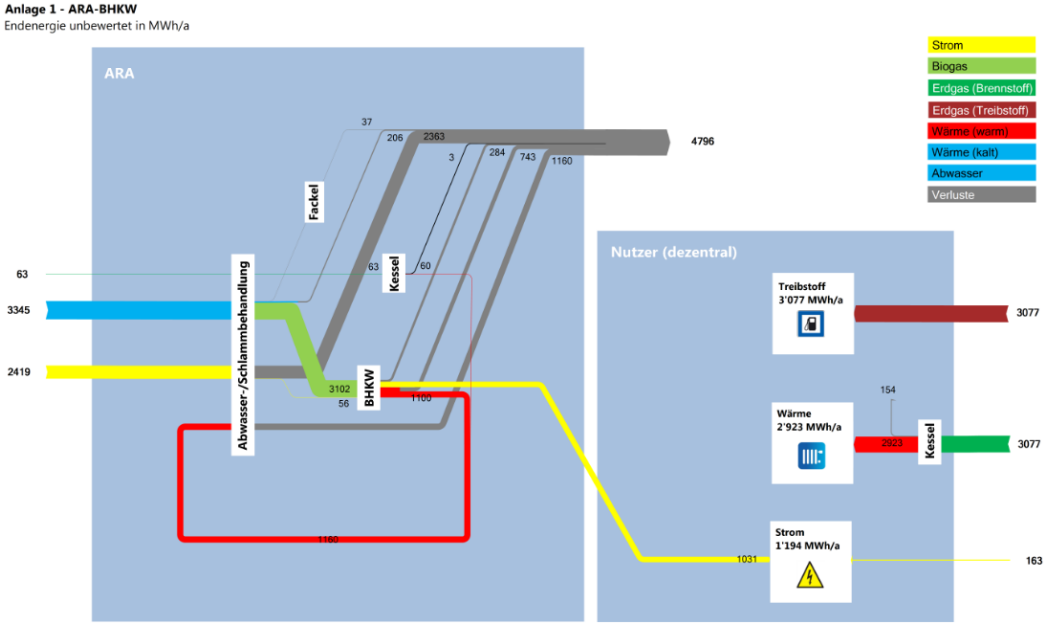


Abbildung 13: ARA 1, Energieflussdiagramm Situation heute

Rund 60% der BHKW-Abwärme kann auf der ARA genutzt werden, die restliche

Abwärme wird mit Rückkühlern an die Umgebung abgegeben (im Energiefluss-diagramm als Verlust dargestellt).

Die Verluste setzen sich wie folgt zusammen:

▪ Fackelverluste	37 MWh/a
▪ Abwasserwärme ungenutzt	206 MWh/a
▪ Wärmeverluste Stromverbrauch (Reibung, etc.)	2363 MWh/a
▪ Kaminverluste Kessel	3 MWh/a
▪ Kaminverluste BHKW	284 MWh/a
▪ BHKW-Abwärme ungenutzt	743 MWh/a
▪ Wärmeverluste Raum- und Fermenterheizung	1160 MWh/a

4.2.2 Varianten mit Biogaseinspeisung

Beschreibung

Die Klärgasaufbereitung und Einspeisung in das Gasnetz weist zwangsläufig grössere Energieflüsse über die ARA-Systemgrenze auf, als dies bei der Verstromung im ARA-BHKW der Fall ist.
Im Gegensatz zum ARA-BHKW wird bei der Einspeisung nicht Strom, eine Form von Endenergie, an die Nutzer verteilt, sondern das aufbereitete Biogas. Die Nutzung des Biogases erfolgt bei den dezentralen Verbrauchern.

Die Berechnungen werden für alle vier Nutzungsprofile durchgeführt:

- Nutzung nur als Treibstoff,
- Nutzung nur zum Heizen,
- Nutzung nur im BHKW und
- gemischte Nutzung (20% Treibstoff, 20% Heizen, 60% BHKW),

im nachfolgenden Energieflussdiagramm ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die Variante gemischte Nutzung abgebildet.

Energiefluss-diagramm

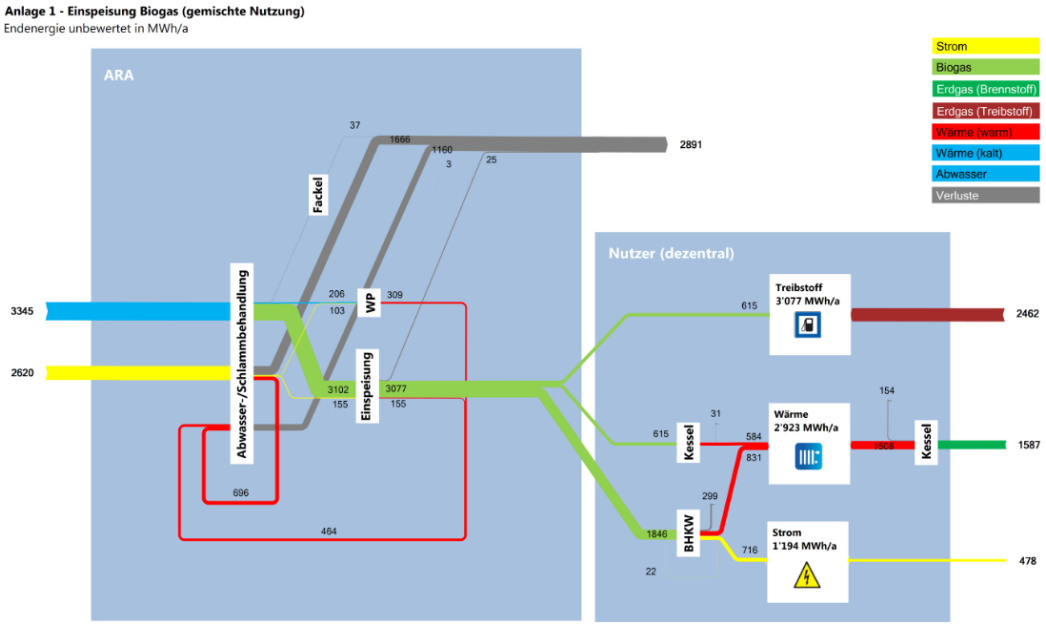


Abbildung 14: ARA 1, Energieflussdiagramm mit Biogaseinspeisung (gemischte Nutzung)

Bei der Variante Biogaseinspeisung wird angenommen, dass 60% des Wärmebedarfs für die Fermenter- und Infrastrukturheizung mittels Prozess-Wärmerückgewinnung[12] gedeckt werden kann. Der fehlende Wärmebedarf wird durch eine Abwasser-Wärmepumpe erzeugt. Wenn in den Berechnungen der WRG-Anteil variiert wird, zeigt sich, dass dessen Einfluss auf die Resultate gering ist. Für die

[12] Es wird angenommen, dass die Prozess-Wärmerückgewinnung nur bei der Variante mit Biogaseinspeisung wirtschaftlich realisierbar ist, da bei den Varianten mit ARA-BHKW bereits genügend Abwärme vorhanden ist und deshalb eine WRG zulasten Wärmenutzung BHKW gehen würde. In den meisten Fällen ist sogar überschüssige Abwärme vorhanden, die über Rückkühlung an die Umwelt abgegeben werden muss.

Fackelverluste wird angenommen, dass diese gleich gross sind wie bei der Basisvariante (konservative Annahme, da bei Einspeisung eher kleiner).

4.2.3 Variantenvergleich

Primärenergie & Treibhausgase

Für sämtliche Energieströme, welche die Systemgrenze überschreiten, wird eine Primärenergie- und Treibhausgasbilanz erstellt. Dazu werden die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Primärenergie- und Treibhausgasfaktoren verwendet. In der nachfolgenden Abbildung sind Resultate für die Basisvariante (Situation heute mit ARA-BHKW) und die Biogaseinspeisung mit gemischter Nutzung dargestellt. Die Ergebnisse sind für die beiden Strommix CH 2010 und CH 2050 dargestellt.

Der Anteil unter dem weissen Trennstrich (hell) entspricht der Primärenergie und den Treibhausgasemissionen auf der ARA, der Anteil über dem Trennstrich (dunkel) entspricht der Nutzerseite.

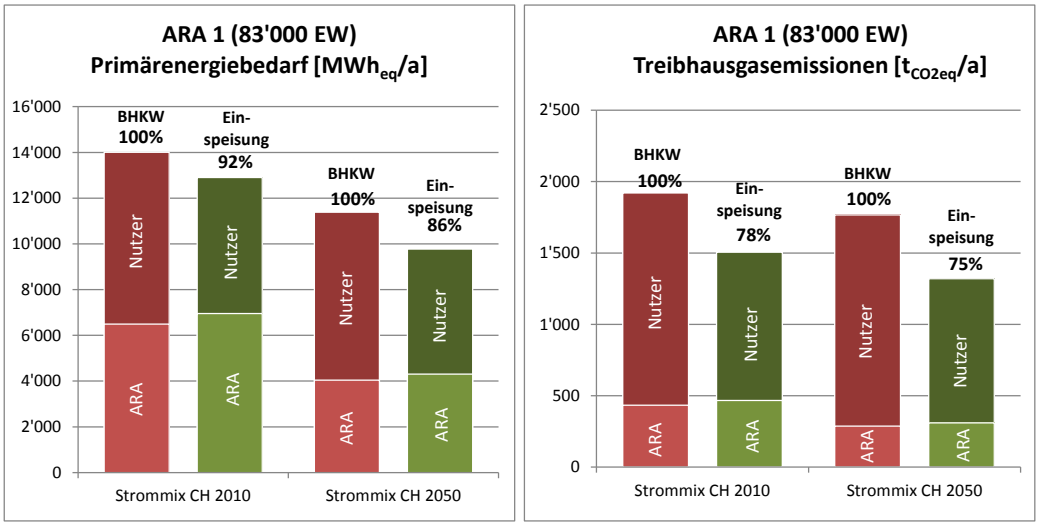


Abbildung 15: ARA 1, Vergleich Primärenergie, Treibhausgasemissionen

Im Vergleich zur Basisvariante mit ARA-BHKW kann der Primärenergiebedarf bei der Biogaseinspeisung mit gemischter Nutzung um rund 8% (Strommix CH 2010) bzw. um 14% (Strommix CH 2050) reduziert werden.

Die Treibhausgasemissionen sinken bei der Biogaseinspeisung mit gemischter Nutzung um rund 22% (Strommix CH 2010) bzw. um 25% (Strommix CH 2050).

Wird nur die ARA separat betrachtet (Anteil unter weisser Trennlinie) steigen der Primärenergieeinsatz und die Treibhausgasemissionen bei der Variante mit Biogaseinspeisung leicht an, allerdings ist auf der Nutzerseite eine deutliche Einsparung zu erkennen.

Im Anhang 10.3 sind die Ergebnisse für alle Nutzungsvarianten (Treibstoff, Heizen, BHKW und gemischte Nutzung) dargestellt.

4.3 ARA 2 (145‘000 EW)

4.3.1 Ist-Zustand

Beschreibung

Die Anlage 2 entspricht einer ARA mit rund 1.0 Mio. Nm^3/a Klärgasproduktion und Klärgasverbrennung im ARA-BHKW (basierend auf realen, gemessenen Werten).

Im Vergleich zur Anlage 1 verfügt diese ARA bereits heute über eine geringe Prozess-Wärmerückgewinnung, zudem speist sie einen **externen Wärmeverbund**. Damit kann ein Grossteil der überschüssigen BHKW-Abwärme ins Fernwärmenetz abgegeben werden. Der fehlende Wärmebedarf für das Fernwärmenetz wird durch eine Abwasser-Wärmepumpe und einen fossilen Spitzenlastkessel bereitgestellt. Der Strom wird ins Netz eingespeist (KEV-Strom).

Die Referenzsituation (Stand heute) der Anlage 2 ist in Abbildung 16 ersichtlich. Eine grössere Darstellung des Energieflussdiagramms ist im Anhang 10.4 abgebildet.

Energiefluss-diagramm

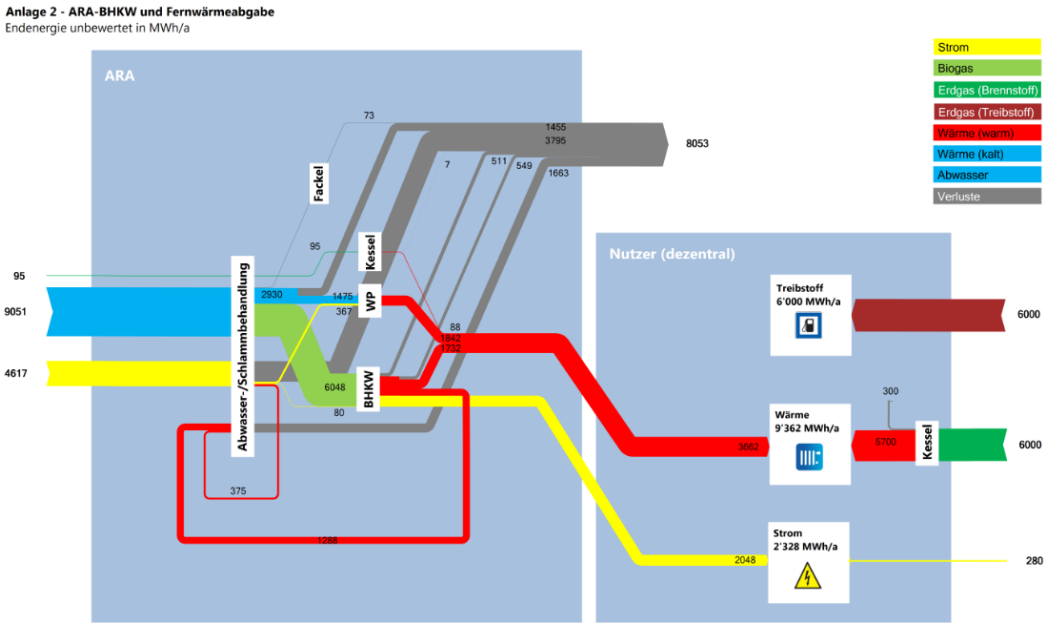


Abbildung 16: ARA 2, Energieflussdiagramm Situation heute

Ein Grossteil der BHKW-Abwärme kann für die Beheizung der ARA und des Fernwärmenetzes genutzt werden. Nur ein kleiner Teil muss im Sommer via Rückkühler vernichtet werden.

Die Verluste setzen sich wie folgt zusammen:

- Fackelverluste 73 MWh/a
- Abwasserwärme ungenutzt 1455 MWh/a
- Wärmeverluste Stromverbrauch (Reibung, etc.) 3795 MWh/a
- Kaminverluste Kessel 7 MWh/a

- Kaminverluste BHKW 511 MWh/a
- BHKW-Abwärme ungenutzt 549 MWh/a
- Wärmeverluste Raum- und Fermenterheizung 1663 MWh/a

4.3.2 Varianten mit Biogaseinspeisung

Beschreibung

Im nachfolgenden Energieflussdiagramm (Abbildung 17) ist die Variante mit Biogaseinspeisung und gemischter Nutzung für die Anlage 2 dargestellt. Die Berechnung der restlichen Varianten (Treibstoff, Heizung und BHKW dezentral) sind aus dem Anhang 10.14 ersichtlich.

Auch bei der Anlage 2 wird angenommen, dass rund 60% des Wärmebedarfs (Fermenter- und Infrastrukturheizung) mittels Prozess-Wärmerückgewinnung[12] bereitgestellt werden können. Der fehlende Wärmebedarf wird durch die Abwasser-Wärmepumpe erzeugt.

Energiefluss-diagramm

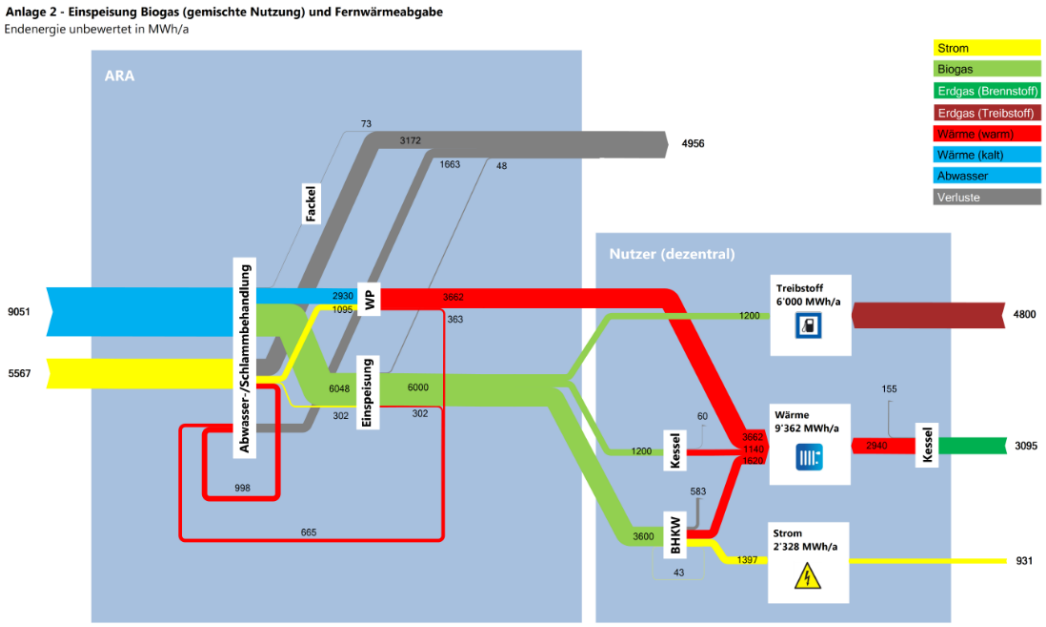


Abbildung 17: ARA 2, Energieflussdiagramm mit Biogaseinspeisung (gemischte Nutzung)

Der gesamte Fernwärmebedarf wird via Abwasser-Wärmepumpe erzeugt.

4.3.3 Variantenvergleich

Primärenergie & Treibhausgase

Die Resultate für die Basisvariante (Situation heute mit ARA-BHKW) und die Biogaseinspeisung mit gemischter Nutzung sind in der folgenden Abbildung ersichtlich.

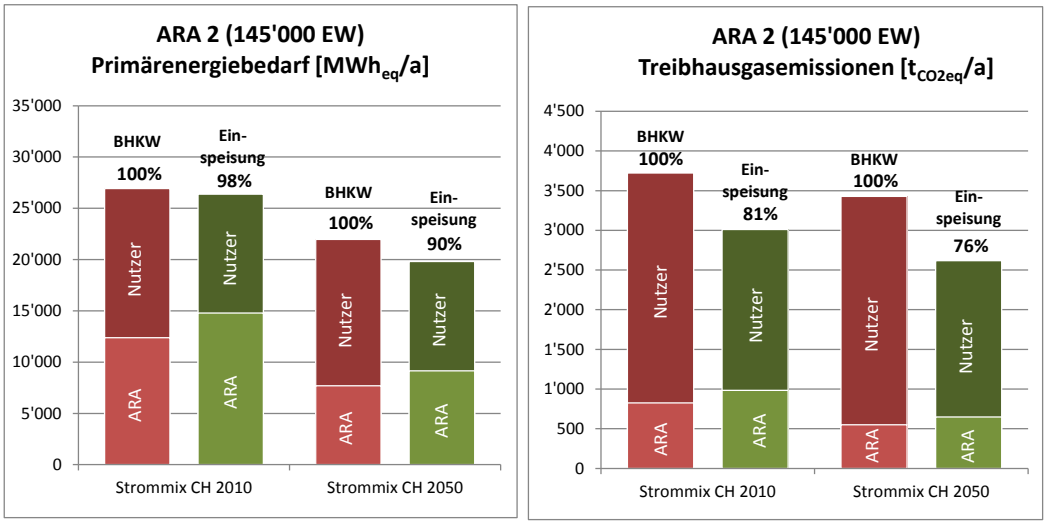


Abbildung 18: ARA 2, Vergleich Primärenergie, Treibhausgasemissionen

Bei der Anlage 2 resultiert bei der Biogaseinspeisung mit gemischter Nutzung ein Rückgang des Primärenergiebedarfs von rund 2% (Strommix CH 2010) bzw. 10% (Strommix CH 2050).

Bei den Treibhausgasemissionen ist die Differenz deutlich ausgeprägter. Sie beträgt rund 19% (Strommix CH 2010) bzw. 24% (Strommix CH 2050).

Wird nur die ARA separat betrachtet (heller Anteil unter weisser Trennlinie) steigen der Primärenergieeinsatz und die Treibhausgasemissionen bei der Variante mit Biogaseinspeisung an, allerdings ist auf der Nutzerseite eine deutliche Einsparung zu erkennen.

Die Ergebnisse für die anderen Nutzungsvarianten sind im Anhang 10.6 dargestellt.

4.4 ARA 3 (200'000 EW)

4.4.1 Ist-Zustand

Beschreibung

Die Anlage 3 entspricht einer ARA mit einer Klärgasproduktion von rund 2.0 Mio. Nm^3/a. Das Klärgas wird primär im ARA-BHKW genutzt, ein kleiner Anteil wird im Gaskessel verbrannt (Berechnungen basierend auf realen, gemessenen Werten). Zusätzlich werden eine Abwasser-Wärmepumpe und ein fossiler Spitzenkessel betrieben, damit neben dem Wärmebedarf für die Fermenter- und Infrastrukturheizung genügend Wärme für die **Klärschlammtrocknung** (Niedertemperatur-Bandtrockner) vorhanden ist.

Energiefluss-diagramm

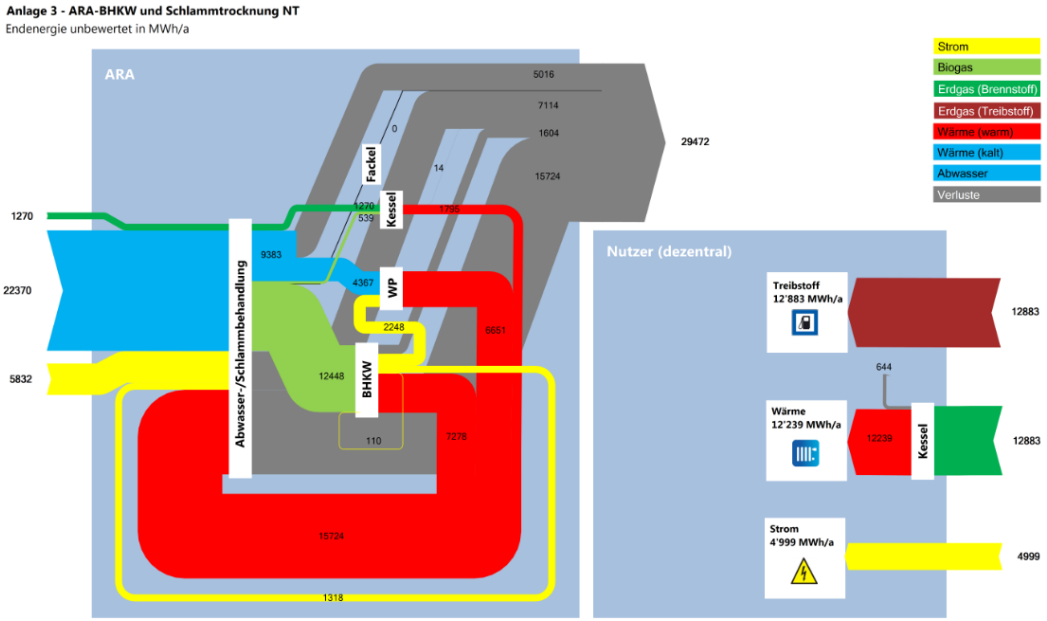


Abbildung 19: ARA 3, Energieflussdiagramm Situation heute

Die produzierten Energiemengen (Wärme und Strom) können auf der ARA vollständig genutzt werden. Es wird weder Strom noch Wärme an externe Nutzer abgegeben.

Die Verluste setzen sich wie folgt zusammen:

- Fackelverluste 0 MWh/a
- Abwasserwärme ungenutzt 5016 MWh/a
- Wärmeverluste Stromverbrauch (Reibung, etc.) 7114 MWh/a
- Kaminverluste Kessel 14 MWh/a
- Kaminverluste BHKW 1604 MWh/a
- BHKW-Abwärme ungenutzt 0 MWh/a
- Wärmeverluste Raum- und Fermenterheizung 15724 MWh/a

4.4.2 Varianten mit Biogaseinspeisung

Beschreibung

In der Abbildung 20 ist das Energieflussdiagramm für die Biogaseinspeisung mit gemischter Nutzung für die ARA 3 dargestellt. Die restlichen Varianten (Treibstoff, Heizung und BHKW dezentral) sind im Anhang 10.14 dargestellt.

Auch hier wird angenommen, dass rund 60% des Wärmebedarfs für die Fermenter- und Infrastrukturheizung (ohne Klärschlammtrocknung) mittels Prozess-Wärmerückgewinnung[12] erzeugt wird. Der fehlende Wärmebedarf wird durch Abwasser-Wärmepumpen bereitgestellt.

Energiefluss-diagramm

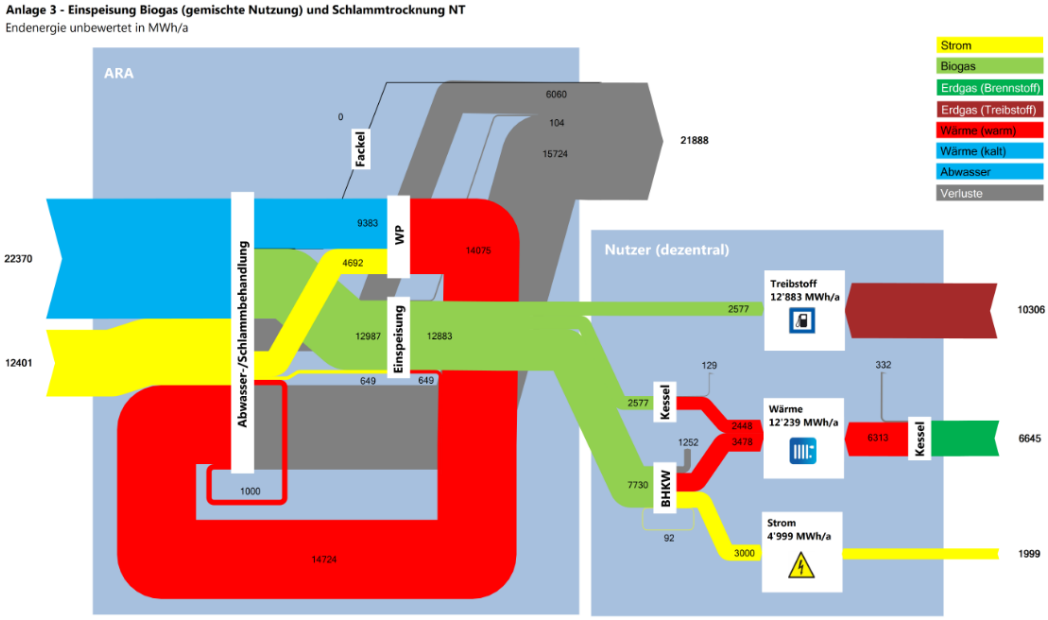


Abbildung 20: ARA 3, Energieflussdiagramm mit Biogaseinspeisung (gemischte Nutzung)

4.4.3 Variantenvergleich

Primärenergie & Treibhausgase

In der Abbildung 21 sind wiederum nur die Ergebnisse der Basisvariante und der Biogaseinspeisung mit gemischter Nutzung ersichtlich. Die Resultate der anderen Nutzungsvarianten werden im Anhang 10.9 gezeigt.

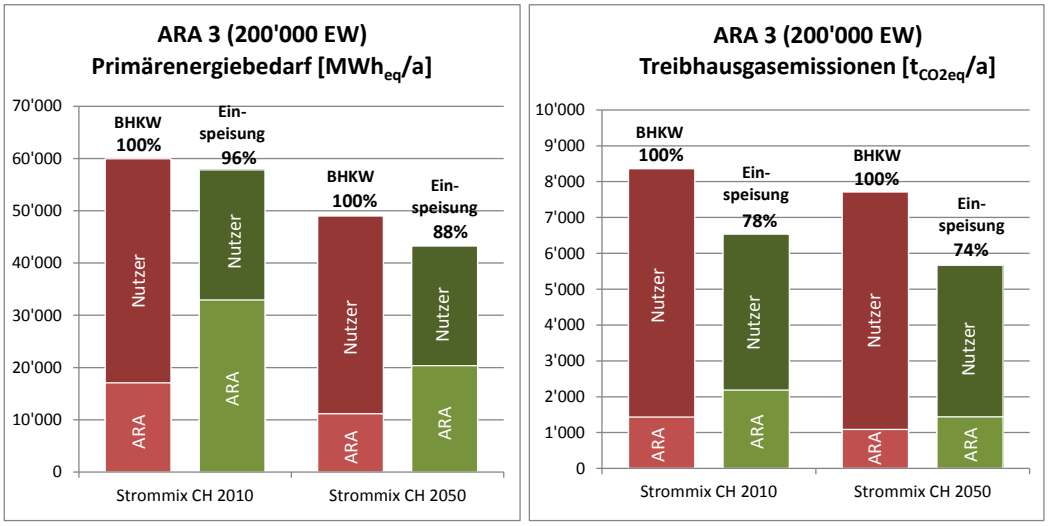


Abbildung 21: ARA 3, Vergleich Primärenergie, Treibhausgasemissionen

Mit der Biogaseinspeisung und der gemischten Nutzung reduziert sich die Primärenergiebedarf um 4% (Strommix CH 2010) bzw. 12% (Strommix CH 2050).

Die Treibhausgasemissionen sinken dabei um 22% (Strommix CH 2010) respektive 26% (Strommix CH 2050).

4.5 KVA-Abwärme

Bei den drei betrachteten ARA (existierende Anlagen) gibt es keine KVA in unmittelbarer Nähe. Falls sich eine KVA in der Nähe der ARA befindet, macht es allenfalls Sinn die KVA-Abwärme zu nutzen, anstatt einer Abwasser-WP zu installieren.

ARA 3 mit KVA-Abwärme

Um den Einfluss der KVA-Abwärme aufzuzeigen, wurde die Anlage 3 mit KVA-Abwärme gerechnet. Die Grundvariante mit BHKW wurde dabei nicht verändert (d.h. ohne KVA-Abwärme gerechnet) und stellt den Ist-Zustand dar wie in Abschnitt 4.4 aufgezeigt. Bei der Variante mit Biogaseinspeisung wurde anstelle der Abwasser-WP ein Wärmebezug ab KVA eingesetzt.

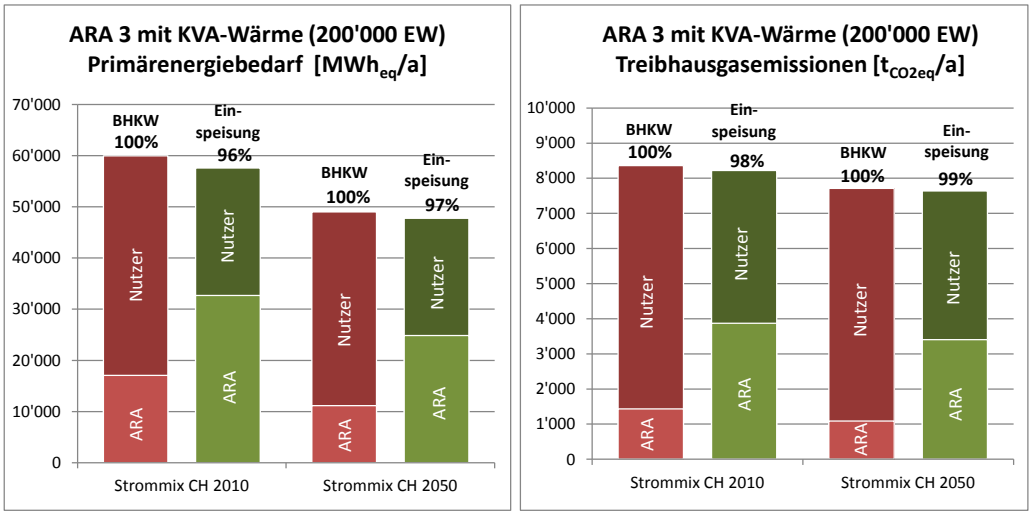


Abbildung 22: ARA 3 mit KVA-Abwärme, Vergleich Primärenergie, Treibhausgasemissionen

Mit der Biogaseinspeisung und der gemischten Nutzung reduziert sich die Primärenergiebedarf um 4% (Strommix CH 2010) bzw. 3% (Strommix CH 2050). Die Reduktion des Primärenergiebedarfs ist mit dem Strommix CH 2010 gleich hoch wie im Abschnitt 4.4 mit Abwasser-Wärmepumpe. Mit dem Strommix 2050 resultiert allerdings ein fast identischer Primärenergiebedarf.

Die Treibhausgasemissionen sinken dabei um 2% (Strommix CH 2010) respektive 1% (Strommix CH 2050). Bei den Treibhausgasemissionen resultiert eine deutlich geringere Reduktion im Vergleich zum Abschnitt 4.4 mit Abwasser-WP.
Der Einsatz von KVA-Abwärme verschlechtert das Ergebnis betreffend Primärenergieeinsatz und Treibhausgasemissionen. Grund dafür sind die hohen Primärenergie- und Treibhausgasfaktoren für Fernwärme ab KVA (enthalten auch die graue Energie und Treibhausgasemissionen). Liegt die ARA unmittelbar neben der KVA, oder verfügt bereits über einen Fernwärmeanschluss und handelt es sich bei der KVA-Wärme um bisher ungenutzte Abwärme, können als Primärenergie- und Treibhausgasfaktoren auch deutlich tiefere Werte eingesetzt werden. Die führt zu einem deutlich besseren Ergebnis. In diesem Fall ist die Nutzung von KVA-Wärme zu bevorzugen (Wegfall der ARA-Abwasserwärmepumpe).

5 Schweizerisches Potential

5.1 Einleitung

Im Kapitel 4 wurden drei unterschiedliche ARA betrachtet, um die Ergebnisse und Auswirkungen anhand einzelner ARA aufzuzeigen. Im Kapitel 5 wird nun das gesamtschweizerische Potential betrachtet.

5.2 Grundlagen und Randbedingungen

Datenerhebungen

Ein Grossteil der Grundlagen basiert auf Datenerhebungen der Firma Holinger AG aus den vergangenen Jahren, welche für die Erarbeitung diverser Studien (z.B. [3], [4], etc.) verwendet wurden. Zusätzlich wurden die aktuellen Jahresberichte diverser ARA studiert, damit die Datengrundlage vervollständigt bzw. aktualisiert werden konnte. Die folgenden Grössen konnten für praktisch alle betrachteten ARA ermittelt werden und basieren auf realen, gemessenen Werten.

- Abwasseranfall in m^3/a
- CSB im ARA-Zulauf (Rohwasser) in kg/d
- Einwohnergleichwerte (mittlere Belastung $EWG_m = EWG_{120g\ CSB}$)
- Frischschlammmengen (Eigen- und Fremdschlamm) in t/a bzw. t_{TS}/a
- Klärgasdaten in Nm^3/a:
  - Klärgasproduktion
  - Klärgasverbrauch Heizung
  - Klärgasverbrauch Stromerzeugung
  - Klärgasverbrauch Fackel
  - Klärgasverkauf
- Stromdaten in kWh/a
  - Stromverbrauch total
  - Stromproduktion
  - Stromdefizit (Netzbezug)
- Art der Klärschlammbehandlung und -verwertung:
  - Faulung vorhanden
  - Klärschlammtrocknung (Nieder-, Mittel- und Hochtemperatur)
  - Klärschlammverbrennung (intern, KVA und Zementwerke)

Die Datengrundlage für die nachfolgenden Grössen konnte nicht für alle ARA restlos ermittelt werden:

- Heizölverbrauch in kWh/a
- Erdgasverbrauch in kWh/a
- Verbrauch anderer Wärmeträger in kWh/a (z.B. Holz, Heizöl schwer, Alternativbrennstoffe, etc.)

- Wärmebedarf in kWh/a
- Wärmeeinkauf und externe Wärmeabgabe (Fernwärme) in kWh/a

Kennzahlen

Falls einzelne Daten nicht vorhanden sind, wurden die Grössen anhand der nachfolgenden Kennzahlen ermittelt. Die Kennzahlen stammen grösstenteils aus den Holinger-Berichten [3] und [4].

Abwassermenge	380 l/EWG_m/d
Klärgasproduktion	25 l/EWG_m/d
Heizwert Klärgas	6.3 kWh_{Hu}/Nm^3 (bzw. 22.7 MJ/Nm^3)
Wärmebedarf Faulung	15 kWh/EWG_m/d (variiert von 13 – 17)
Wärmebedarf Infrastruktur	2 kWh/EWG_m/d (10% Infrastruktur und 90% Faulung)
Wärmebedarf KS-Trocknung	1‘900 kWh/t_{TS} (variiert von 1‘800 – 2‘050)
Nutzungsgrad BHKW (Strom)	40%
Nutzungsgrad BHKW (Wärme)	45%
Nutzungsgrad Kessel	90% (je nach Alter, Brennstoff 85% - 95%)

5.3 Zustand heute

5.3.1 Gemeinden mit ARA und Erdgasnetz

ARA-Standorte

In der Abbildung 23 sind sämtliche Schweizer ARA-Standorte ersichtlich. Industrielle ARA, Vorkläranlagen und Vergärungs-/Kompogasanlagen sind darin nicht enthalten und auch in der vorliegenden Potentialabschätzung nicht berücksichtigt.

Abbildung 23: Schweizerkarte aller ARA-Standorte

Als Datenquelle wurde die „Adressliste Schweizer Kläranlagen mit Angabe der Ausbaugrösse“[13] des BAFU (Stand 27.11.2012) verwendet. Insgesamt sind rund 850 ARA auf der Liste geführt, wovon allerdings einige heute nicht mehr in Betrieb sind. Dies betrifft aber hauptsächlich kleinere ARA (< 30‘000 EWG), welche für die vorliegende Potentialbetrachtung ohnehin nicht berücksichtigt werden.

Erdgasnetz

Für die Betrachtung des Schweizweiten Potentials zur Biogaseinspeisung müssen die Gemeinden mit Erdgasnetz eruiert werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt sämtliche Gemeinden mit einem bestehenden Erdgasnetz.

[13] Herunterzuladen unter www.bafu.admin.ch/gewaesserschutz/01295/01296/01298/index.html?lang=de

Abbildung 24: Schweizerkarte aller Gemeinden mit Erdgasnetz

Insgesamt gibt es in 1'248 Gemeinden ein Erdgasnetz. Der Hauptteil davon befindet sich im Mittelland, Jura und Tessin. In den Bergregionen ist nur vereinzelt ein Erdgasnetz vorhanden.

Basis für Potentialabschätzung

Für die Betrachtung des Schweizerischen Potentials wurden nur die ARA mit mehr als 30'000 EWG betrachtet, da für kleinere ARA aus wirtschaftlichen Gründen die Biogasaufbereitung und -einspeisung ins Erdgasnetz derzeit noch keine Option darstellt.

Zudem werden nur diejenigen ARA betrachtet, in deren Gemeinde ein bestehendes Erdgasnetz vorhanden ist (oder ein Erdgasnetz in unmittelbarer Nähe zur ARA existiert).

In der Abbildung 25 sind sämtliche Gemeinden mit einer ARA mit ≥ 30'000 EWG und einem Erdgasnetz dargestellt. Insgesamt 105 ARA erfüllen diese Bedingungen. Die folgenden 6 ARA werden allerdings vom Potential ausgeschlossen:

- ARA Domat-Ems: Der Klärschlamm wird in der ARA Chur behandelt (Probleme mit Chemie-Abwasser bei Faulung).
- ARA Locarno (Maggia-CDL): Der Klärschlamm dieser ARA wird in die ARA Locarno (Ticino) behandelt.
- ARA Bois-de-Bay: ARA hat keine Faulung (zentrale Faulung in Vernier/Aire)
- Industrie-ARA Monthey (Ciba-Geigy)
- Industrie-ARA Vernier-Ouest (Givaudan)
- Industrie-ARA Papierfabrik Tela

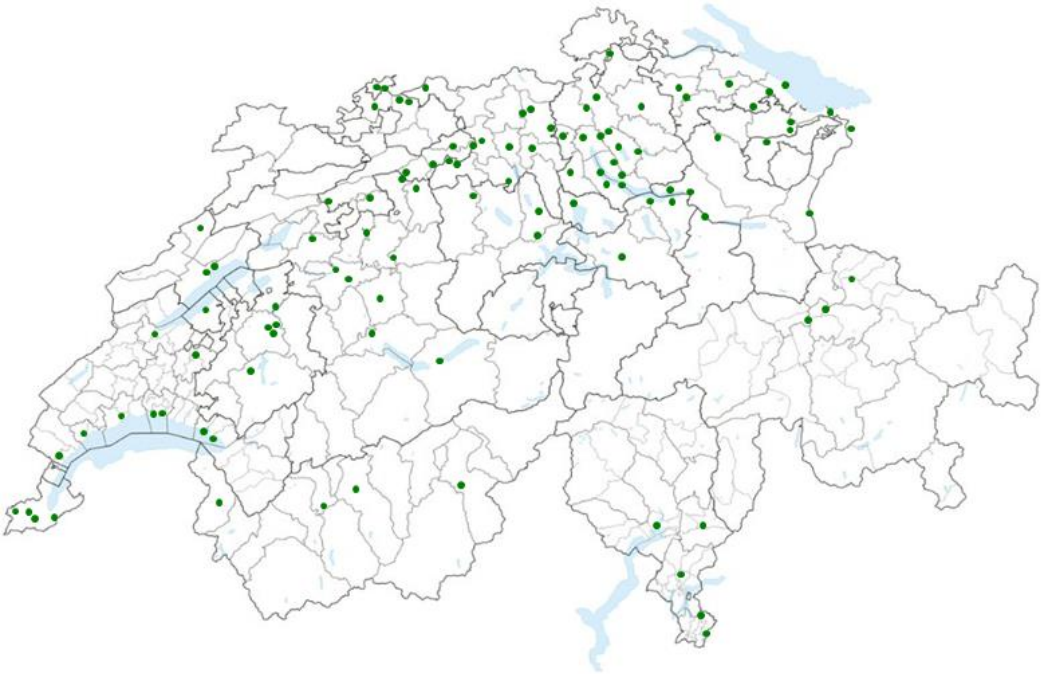


Abbildung 25: Schweizerkarte aller Gemeinden mit ARA > 30'000 EWG und Erdgasnetz

Somit werden 99 ARA in die Potential-Berechnungen einbezogen. Die Grössen dieser ARA sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Einwohnerwerte	Anzahl ARA
ARA mit 30'000 - 50'000 EW	39 Stk.
ARA mit 50'001 - 100'000 EW	36 Stk.
ARA mit 100'001 - 200'000 EW	15 Stk.
ARA mit mehr als 200'000 EW	9 Stk.

Abbildung 26: ARA-Grössen Schweizer Potential

Diese 99 ARA behandeln eine Abwassermenge von rund 880 Mio. m^3/a. Die mittlere Belastung dieser ARA beträgt zusammen rund 7'100'000 $EWG_{120g\ CSB}$.

Heute produzieren diese 99 ARA rund 78.6 Mio. Nm^3/a Klärgas, was einer Energiemenge von rund 495 GWh_{Hu}/a entspricht. Die heutige Klärgasnutzung ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Ist-Zustand			
Anzahl ARA	Stk.	99	
Mittlere Belastung	Mio. $EW_{120g\ CSB}$	7.1	
Klärgasproduktion	Mio. Nm^3/a	78.6	
Nutzung BHKW	Mio. Nm^3/a	51.2	65%
Nutzung Kessel	Mio. Nm^3/a	12.7	16%
Nutzung Biogaseinspeisung	Mio. Nm^3/a	10.8	14%
Nutzung Verkauf	Mio. Nm^3/a	1.4	2%
Abfackelung Klärgas	Mio. Nm^3/a	2.5	3%

Abbildung 27: Klärgasnutzung Ist-Zustand

Bereits heute wird das Klärgas fast vollständig genutzt. Rund 2/3 der gesamten Klärgasmenge werden heute in BHKW verstromt. Rund 14% werden aufbereitet und ins Erdgasnetz eingespeist, dies entspricht einer Energiemenge von 68 GWh_{Hu}/a (bzw. 76 GWh_{Ho}/a).

5.3.2 Energiebedarf Ist-Zustand

Energiefluss-diagramm

Wie bei den ARA 1 - 3 wird der Energiebedarf auf der Nutzerseite für Treibstoff, Wärme und Strom definiert. Das Energieflussdiagramm des Ist-Zustands für die 98 ARA ist in der Abbildung 28 dargestellt.

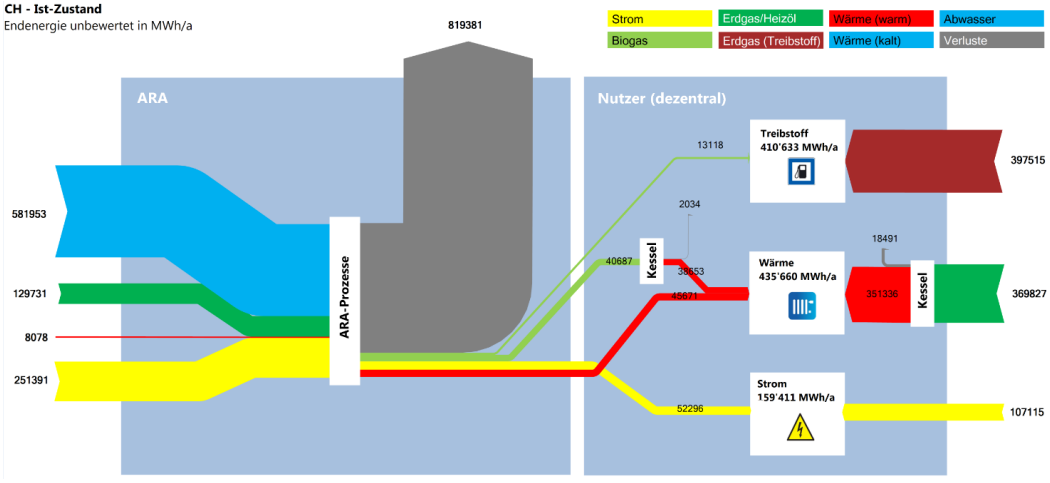


Abbildung 28: Energieflussdiagramm Ist-Zustand

Eine grössere Darstellung des Energieflussdiagramms ist im Anhang 10.10 abgebildet, die entsprechenden Berechnungen dazu werden im Anhang 10.14 aufgezeigt.

5.4 Theoretisches Potential

Beschreibung

Für die Berechnung des Schweizerischen Potentials der Biogaseinspeisung werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Verwertung des Klärschlamms bleibt unverändert (Klärschlammverbrennungen und Klärschlammtrocknungen werden beibehalten). Eine allfällig mögliche Optimierung, z.B. durch Zentralisierung der Faulung, wird nicht berücksichtigt.
- 60% des Wärmebedarfs für die Fermenter- und Infrastrukturheizung wird mittels Prozess-Wärmerückgewinnung gedeckt (Prozess-WRG wird nicht realisiert, wenn auf der ARA ein BHKW vorhanden ist, da bereits genügend BHKW-Abwärme vorhanden ist).
- Der interne und externe Wärmebedarf wird wenn möglich mit Abwasser-Wärmepumpen gedeckt. Eine im Zusammenhang mit Biogaseinspeisung sehr sinnvolle, erweiterte externe Abwasserwärmenutzung (Anergienetz etc.) wird in der Potentialabschätzung nicht berücksichtigt.
- Die ARA, welche heute keine Faulung haben, werden mit einer Faulung nachgerüstet (oder der Klärschlamm wird in eine grosse ARA mit Faulung geliefert).
- Für die Fackelverluste wird angenommen, dass diese gleich gross sind wie heute (konservative Annahme, da bei Einspeisung eher kleiner).

In der nachfolgenden Tabelle ist die Klärgasnutzung für das theoretische Potential zusammengestellt.

Potential Biogaseinspeisung			
Klärgasproduktion	Mio. Nm^3/a	81.5	
Nutzung BHKW	Mio. Nm^3/a	6.4	8%
Nutzung Kessel	Mio. Nm^3/a	7.5	9%
Nutzung Biogaseinspeisung	Mio. Nm^3/a	63.6	78%
Nutzung Verkauf	Mio. Nm^3/a	1.4	2%
Abfackelung Klärgas	Mio. Nm^3/a	2.6	3%

Abbildung 29: Klärgasnutzung Schweizer Potential Biogaseinspeisung

Durch den Bau der zusätzlichen Faulungen kann die Klärgasproduktion um rund 2.9. Mio. Nm^3/a bzw. rund 19 GWh_{Hu}/a erhöht werden.

Die Biogaseinspeisung könnte um knapp 53 Mio. Nm^3/a gesteigert werden. Dies entspricht einer Energiemenge von rund 333 GWh_{Hu}/a.

Energiefluss-diagramm

Das Energieflussdiagramm für das Potential der Biogaseinspeisung, hier am Beispiel der gemischten Nutzung, ist in Abbildung 30 dargestellt (siehe Anhang 10.8 für eine grössere Darstellung). Die entsprechenden Berechnungen dazu sind im Anhang 10.14 ersichtlich.

Im Vergleich zum Ist-Zustand resultieren bei der maximalen Biogaseinspeisung deutlich geringere Verluste auf Seiten der ARA. Der Hauptgrund dafür ist, dass wesentlich mehr Anergie aus dem Abwasser für die Wärmepumpen genutzt werden kann.

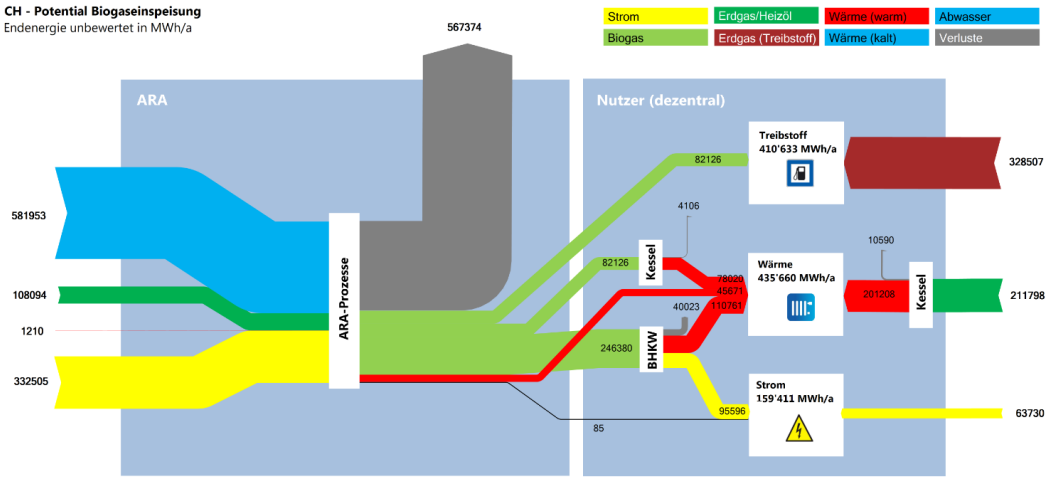


Abbildung 30: Energieflussdiagramm Schweizer Potential Biogaseinspeisung (gemischte Nutzung)

5.5 Vergleich Ist-Zustand und Potential

Analog zu den ARA 1 - 3 wird der Endenergiebedarf mit den Primärenergie- und Treibhausgasfaktoren gemäss Abschnitt 3.2 bewertet. In der nachfolgenden Grafik sind die Ergebnisse für die Variante gemischte Nutzung abgebildet. Die Resultate der restlichen Nutzungsarten (Treibstoff, Heizen und BHKW dezentral) sind im Anhang 10.12 dargestellt.

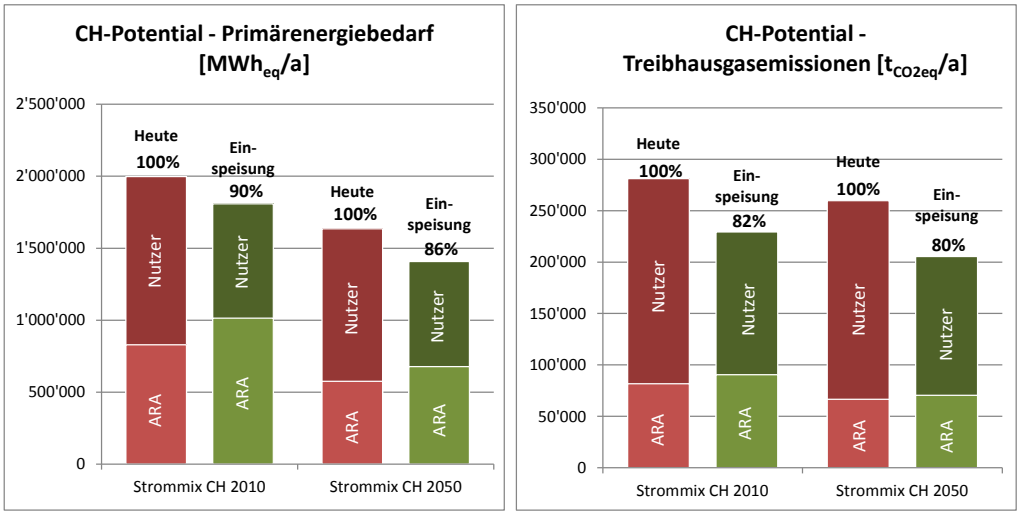


Abbildung 31: Vergleich Primärenergie und Treibhausgasemissionen Ist-Zustand und Potential

Im Vergleich zur heutigen Nutzung des Biogas kann der Primärenergiebedarf mit der maximalen Biogaseinspeisung um 10% (Strommix CH 2010) bzw. um 14% (Strommix CH 2050) reduziert werden.

Bezüglich Treibhausgasemissionen resultiert ein Reduktion von 18% (Strommix CH 2010) bzw. 20% (Strommix CH 2050).

Wird nur die ARA separat betrachtet (Anteil unter weisser Trennlinie) steigen der Primärenergieeinsatz und die Treibhausgasemissionen bei der Variante mit Biogaseinspeisung an, allerdings ist auf der Nutzerseite eine deutliche Einsparung zu erkennen.

6 Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit

Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung muss sowohl aus der Perspektive der ARA-Betreiber als auch aus der Sicht des Biogasabnehmers (in der Regel ein Gasversorgungsunternehmen) gemacht werden. Ungeachtet dessen, dass die Gaswirtschaft zunehmend nach Biogas nachfragt, gibt es den Strom-Benchmark der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV), welcher auf den ersten Blick den ARA-Betreibern einen nicht unbedeutenden Ertrag generiert. Im eigentlichen Sinne decken diese KEV Entschädigungen jedoch die Kosten, die ein BHKW verursacht. Dies wurde auch mit einer Studie des BFE vom 7. Mai 2007 nachgewiesen, welche die Stromgestehungskosten für ein mit Klärgas betriebenes BHKW aufzeigt.

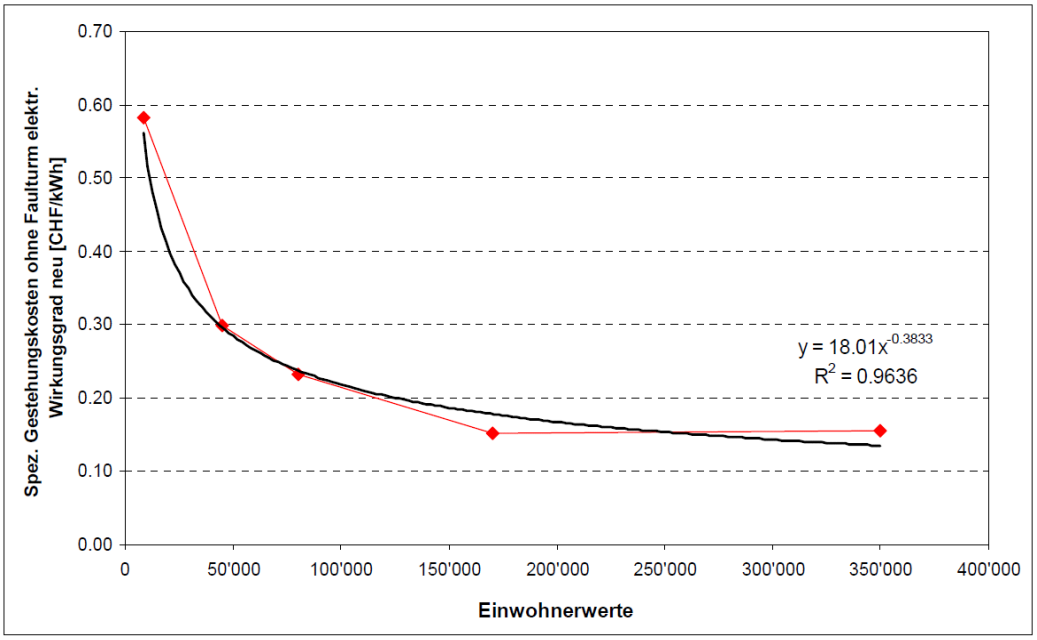


Abbildung 32: Spezifische Stromgestehungskosten ARA-BHKW

Je nach ARA Grösse bzw. BHKW-Modul liegen die Stromgestehungskosten zwischen 15 bis 50 Rp/kWh$_{el}$ und sind somit heute höher als die Marktpreise für Strom, welche aktuell zwischen 8-12 Rp/kWh$_{el}$ liegen. Aus Sicht der ARA gibt es daher bezüglich Stromverbrauch keine finanziellen Einbussen, wenn man auf die Einspeisung umstellt. Im Gegenteil, durch den Strombezug ab Netz könnte die ARA sogar Kosten einsparen. Bei einer ARA mit rund 1 Mio. Nm^3/a Klärgas beträgt diese Einsparung aufgrund tieferen Stromkosten rund 225'000 CHF/a. Mit dem Wegfall der BHKW Wärme muss jedoch die Wärme insbesondere für die Faultürme und den weiteren Bedarf anderweitig erzeugt werden. Falls dazu eine Abwasser-Wärmepumpe eingesetzt wird, würde der Strombezug zur Abdeckung des ARA-Eigenbedarf beim obigem Anlagentyp rund 40'000 CHF/a ausmachen. Siehe dazu auch nachstehendes Diagramm.

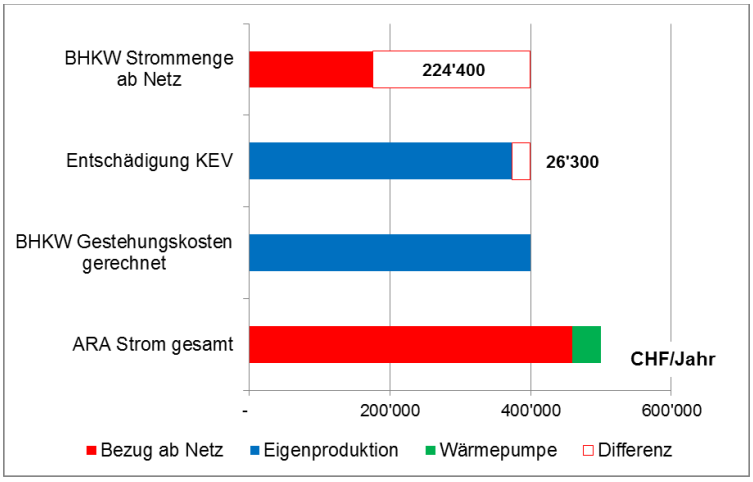


Abbildung 33: Anlagenbeispiel mit 1 Mio. Nm^3/a Klärgas

Diese Betrachtungsweise erlaubt folgende Aussagen:

- KEV Ertrag und BHKW Gestehungskosten sind in der Regel ungefähr gleich hoch. Folglich müssen bei einer Umstellung auf die Einspeisung lediglich die Wärmegestehungskosten für die Ersatzwärmequelle (weil BHKW Wärme wegfällt) durch den Verkauf von Biogas gedeckt werden.
- Da beim Wegfall der BHKW Abwärme die ARA interne Prozessabwärme eher genutzt werden kann, reduziert sich der Netto Wärmebedarf, der extern bezogen werden, muss auf 40-50%. Damit reduzieren sich die effektiven Wärmekosten.

Je nachdem, ob nun die ARA oder der Gasversorger die Investition in die Gasaufbereitung tätigen und deren Betrieb und Wartung sicherstellen, muss die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung an unterschiedlichen Schnittstellen vorgenommen werden. Es kommen erfahrungsgemäss zwei Modelle zum Einsatz:

a) Gasversorger baut, betreibt die Gasaufbereitung und kauft das Klärgas (Rohgas) dem ARA Betrieb ab.

b) ARA Betreiber trägt die Investitionen in die Biogasaufbereitung und verkauft das aufbereitete Biogas in Form von physischem Gas und einem Biogas-Zertifikat (ökologischer Mehrwert).

Je nach Grösse der Anlagen muss mit spezifischen Kosten (Investition, Betrieb, Wartung und Unterhalt) für die Aufbereitung von Klärgas in der Höhe von 3.5 bis 6 Rp/kWh gerechnet werden. Diese Werte beziehen sich auf den Brennwert und die eingespeiste Biomethanmenge ins Gasnetz inkl. Netzanschluss von weniger als 200 Meter. Bei grösseren Distanzen ist pro 100 Meter mit rund CHF 1'000 pro Jahr bzw. < 0.1 Rp/kWh $_{Ho}$ Mehrkosten zu rechnen.

Auf Basis dieser finanziellen Eckwerte und der Annahme, dass die ARA eine wirtschaftlich gleichwertige Lösung wie bei der Verstromung (mit/ohne KEV) voraussetzt, resultieren folgende Gestehungspreise für das Biogas:

bezogen auf kWh_{Ho} Biogas	**ARA mit KEV**	**ARA ohne KEV**
Entschädigung für das unaufbereitete Klärgas, getrocknet (entspricht den Wärmeersatzkosten)	1.0 bis 4.0 Rp/kWh_{Ho}	1.0 bis 4.0 Rp/kWh_{Ho}
Wegfall der ungedeckten Mehrkosten BHKW (nur im Fall ARA ohne KEV)	-	-1.0 bis -5.0 Rp/kWh_{Ho}
Gestehungskosten für die Aufbereitung und Einspeisung	3.5-6.0 Rp/kWh_{Ho}	3.5-6.0 Rp/kWh_{Ho}
Biogaspreis loco Einspeisestelle Erdgasnetz	**4.5-10.0 Rp/kWh_{Ho}**	**-0.5-9.0 Rp/kWh_{Ho}**

Je kleiner eine Biogasaufbereitung wird, desto höher sind die spezifischen Kosten. Eine untere Grenze der Wirtschaftlichkeit liegt aufgrund der Marktpreise von Biogas bei ARA mit ca. 300'000 m^3 Klärgas bzw. Anlagen mit einer Kapazität von 35 Nm^3/h Klärgas (Rohgas).

In der weiteren Betrachtung gehen wir von einem Durchschnittswert aus und stellen die Vergleichszahlen bis zum Endenergiebezüger (dezentraler Nutzer) dar.

Indikative Werte	**ARA mit KEV**	**ARA ohne KEV**
Durchschnittlicher Biogaspreis loco Einspeisestelle Erdgasnetz (Reingas)	7.5 Rp/kWh_{Ho}	4.0 Rp/kWh_{Ho}
Umrechnung in dezentrale Nutzerformen		
Treibstoff (Biogas)	1.4 CHF/l[14]	1.0 CHF/l
Heizen	8.5 Rp/kWh_{Ho}[15]	5 Rp/kWh_{Ho}
BHKW dezentral Gestehungspreis Strom(klein WKK)[16]	50 Rp/kWh_{el}	15 Rp/kWh_{el}

In den obenerwähnten Preisen sind die Vermarktung, das Biogas-Clearing mit der Oberzolldirektion, Marge, Betriebs- und Absatzrisiken für das Biogas nicht eingerechnet. Eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung würde aufgrund ihrer Komplexität den Rahmen dieser Studie sprengen. Es ist auch klar, dass es

[14] Zapfsäulenpreis für Diesel beträgt rund ca. 1.6 CHF/l
[15] Durchschnittlicher Erdgaspreis für Haushaltskunden beträgt ca. 8-10 Rp/kWh_{Ho}, für 100% Biogas ca. 16 Rp/kWh_{Ho}
[16] bei einem Entschädigung von 14 Rp/kWh für die Wärme

sich hierbei um Richtgrössen handelt und jede ARA ihre eigene Beurteilung bezüglich den finanziellen Eckwerten machen muss.

In der Energieverordnung (EnV) Anhang 5 wird auf die dezentrale Verstromung von Biogas eingegangen.

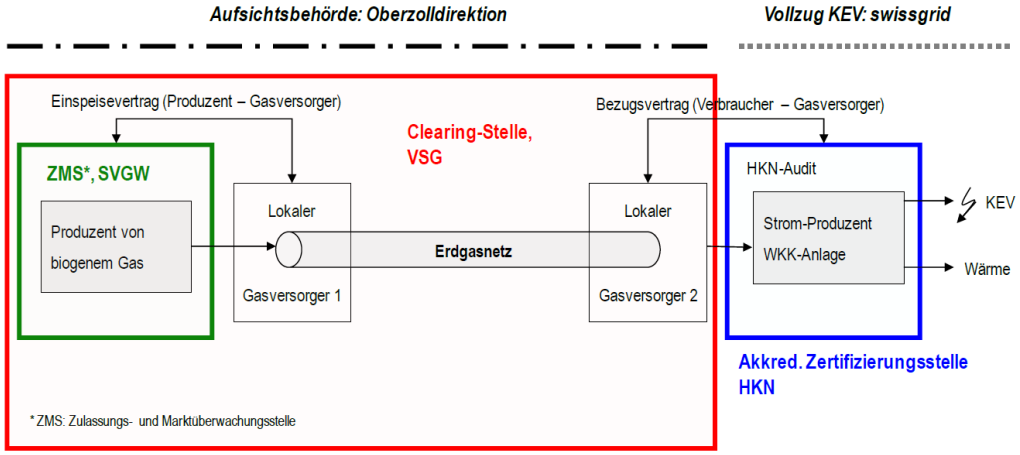


Abbildung 34 Zuständigkeiten KEV Entschädigung für dezentrale Nutzung WKK von Biogas

Der maximale Entschädigungssatz für derart dezentral produzierten KEV Strom beträgt 26.5 Rp/kWh. Folglich ist die dezentrale WKK- Nutzung nur wirtschaftlich, wenn die Biogaspreise loco Einspeisestelle ARA sich möglichst an den Gestehungskosten „ohne KEV" orientieren. Die restlichen Anwendungen als Heizgas und in der Mobilität sind wirtschaftlich.

7 Beurteilung und Ausblick

7.1 Beurteilung

Potential Biogas-einspeisung

In den betrachteten 99 ARA werden heute rund 10.8 Mio. Nm^3/a Biogas ins Erdgasnetz eingespeist, was einem Anteil von 14% der gesamten Biogasmenge dieser ARA entspricht.

Das theoretische Potential für die Biogaseinspeisung liegt bei 63.6 Mio. Nm^3/a. Dies entspricht einem zusätzlichen theoretischen Potential von knapp 53 Mio. Nm^3/a bzw. einer Energiemenge von 333 GWh_{Hu}/a. Selbstredend ist, dass dieses theoretische Potential nicht unmittelbar auch ein wirtschaftlich realisierbares Potential darstellt.

Mit der Forcierung der Einspeisung auf Kosten des BHKW sinkt zwangsläufig die Energieunabhängigkeit der ARA: Die wegfallende Stromeigenproduktion führt zu einem erhöhten Strombezug aus dem Netz und die wegfallende BHKW-Abwärme muss durch eine andere Energiequelle (je nach ARA unterschiedlich) abgedeckt werden.

Primärenergie

Bei der Betrachtung einzelner typischer Anlagen hat für alle drei untersuchten Anlagen 1 - 3 beim Nutzerprofil „Mischnutzung" die Einspeisung einen geringeren Primärenergieaufwand als die Variante mit ARA-BHKW. Je nach Anlage resultiert mit dem heutigen Strommix CH 2010 eine Reduktion von 2% - 8%. Wird der Strommix CH 2050 zu Grunde gelegt resultiert eine Primärenergieeinsparung zwischen 10% und 14%.

Bei einzelnen Nutzungsprofilen (Varianten „Heizen" und „Treibstoff") zeigt sich beim heutigen Strommix ein gleich hoher Primärenergiebedarf. Aus rein energetischer Sicht sind Einspeisung und ARA-BHKW beides sinnvolle Lösungen. Jedoch bei den Treibhausgasemissionen schneidet die Einspeisung generell besser ab. Dieser Vorteil verbessert sich weiter, mit dem Zubau von erneuerbaren Stromquellen (Strommix 2050).

Für das Schweizer Potential (Betrachtung aller 99 ARA) kann durch die Biogasaufbereitung und Einspeisung ins Erdgasnetz eine Einsparung an Primärenergie von 10% bis 14%, d.h. 203 bis 226 GWh/a erzielt werden, je nach gewähltem Strommix.

Treibhausgase

Bei allen Nutzungsprofilen mit Biogaseinspeisung resultieren geringere Treibhausgasemissionen als bei der Variante mit ARA-BHKW (für allen drei Anlagen 1 – 3). Bei der Variante „Mischnutzung" resultiert je nach Anlage eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 21% - 22% (Strommix CH 2010). Mit dem Strommix CH 2050 resultiert sogar eine Einsparung zwischen 24% und 26% gegenüber dem ARA-BHKW.

Beim theoretischen Potential der 99 ARA können die Treibhausgasemissionen um 18% bzw. 20%, d.h. rund 49'500 bzw. 50'900 t_{CO2eq}/a gesenkt werden, je nach

dem zu Grunde gelegten Strommix. Dies entspricht ca. 1% des Reduktionsziels bis ins Jahr 2020 gemäss CO_2-Gesetz.

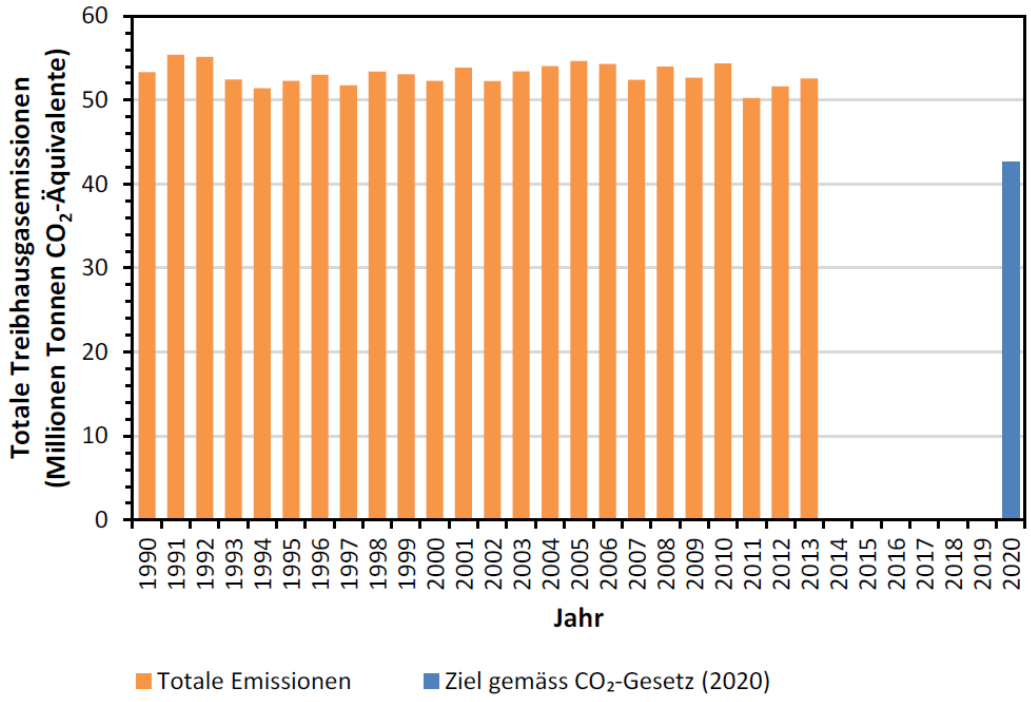


Abbildung 35: Treibhausgasemissionen Schweiz, Bafu[17]

Best-/Worstcase-Betrachtung

Für die Anlage 1 wurden verschiedene Parameter variiert, um deren Einfluss auf die Ergebnisse zu untersuchen.

- Abwärmenutzung BHKW: Je weniger BHKW-Abwärme auf der ARA genutzt werden kann, desto besser schneidet die Biogaseinspeisung gegenüber dem ARA-BHKW ab. Auch wenn 100% der BHKW-Abwärme genutzt werden können, weist die Biogaseinspeisung einen deutlich geringeren Primärenergiebedarf und geringere Treibhausgasemissionen auf. Die Gründe dafür sind, dass bei der Einspeisung eine Abwasser-Wärmenutzung und eine Prozess-WRG realisiert werden (mit einem BHKW macht dies wenig Sinn, da bereits genügend Abwärme vom BHKW vorhanden ist).
- Elektrischer Wirkungsgrad BHKW: Je tiefer der elektrische Wirkungsgrad des BHKW, umso besser sind die Resultate der Biogaseinspeisung im Vergleich zum ARA-BHKW.
- Methanschlupf: Auch bei einem Methanschlupf von 0% beim BHKW und einem erhöhten Schlupf bei der Einspeisung von 1.5% zeigt die Biogaseinspeisung immer noch einen geringeren Primärenergiebedarf und geringere Treibhausgasemissionen.
- Prozess-WRG: Falls keine Prozess-WRG realisiert wird (0% WRG) resultieren

[17] Emissionen von Treibhausgasen nach revidiertem CO_2-Gesetz und Kyoto-Protokoll, 2. Verpflichtungsperiode (2013–2020)

mit der Einspeisung ein geringerer Primärenergiebedarf und geringere Treibhausgasemissionen.

In der nachfolgenden Tabelle ist die prozentuale Verbesserung der Variante mit Biogaseinspeisung (ARA 1) im Vergleich zur Basisvariante mit ARA-BHKW dargestellt. Die Ergebnisse sind nur für die Mischnutzung (20%/20%/60%) gezeigt:

Unterschiede Einspeisung zu ARA-BHKW	Wert	Veränderung Primärenergie	Veränderung Treibhausgas
BHKW-Abwärme genutzt (Basis)	60%	-7.6%	-21.6%
BHKW-Abwärme genutzt (worst)	30%	-9.4%	-22.1%
BHKW-Abwärme genutzt (best)	100%	-5.8%	-21.0%
Elektrischer Nutzungsgrad (Basis)	40%	-7.6%	-21.6%
Elektrischer Nutzungsgrad (worst)	30%	-9.4%	-22.4%
Methanschlupf BHKW/Einspeisung (Basis)	0.5%/0.8%	-7.6%	-21.6%
Methanschlupf BHKW/Einspeisung (worst)	0.0%/1.5%	-7.7%	-18.3%
Prozess-WRG (Basis)	60%	-7.6%	-21.6%
Prozess-WRG (worst)	0%	-3.4%	-19.7%

Abbildung 36: Einfluss verschiedener Parameter auf Primärenergie und Treibhausgas

Beispiel: Mit den Standardwerten (z.B. 60% genutzte BHKW-Abwärme) weist die Biogaseinspeisung 7.6% weniger Primärenergieaufwand und 21.6% weniger Treibhausgasemissionen auf als die Variante mit ARA-BHKW. Wird der Wärmenutzungsgrad auf 30% reduziert (worstcase), vergrössert sich die Differenz zwischen den beiden Varianten. Auch wenn die gesamte Abwärme zu 100% (bestcase) genutzt werden kann, zeigt die Biogaseinspeisung die besseren Resultate.

Abwasserwärmenutzung

Wird auf einer ARA eine Biogaseinspeisung installiert, muss der ARA-eigene Wärmebedarf anderweitig, sinnvollerweise durch Abwasserwärme, gedeckt werden. Wird dazu eine Abwasserwärmeauskopplung erstellt, macht es sehr viel Sinn und verbessert in der Regel die gesamte Wirtschaftlichkeit, wenn man auch ARA-externe Wärmebezüger versorgen kann (Skaleneffekte).

Ähnliche Überlegungen gelten für ARA mit BHKW. Auch hier kann eine ARA-externe Abwasserwärmenutzung sehr sinnvoll und wirtschaftlich sein, wenn auch Skalen- und Synergieeffekte nicht im selben Umfang möglich sein dürften.

Da bei beiden Varianten, Biogaseinspeisung und ARA-BHKW, die energetisch äusserst sinnvolle Nutzung der im Abwasser enthaltenen Wärme möglich ist, wird dieser Effekt in den Potentialbetrachtungen nicht berücksichtigt.

Wirtschaftlichkeit

Setzt man voraus, dass die Stromgestehungskosten eines ARA BHKW in etwa den KEV-Entschädigungen entsprechen, orientiert sich bei dessen Wegfall der Biogaspreis an der Einspeisestelle ins Gasnetz an den Ersatzkosten für die Wärmebereitstellung (1-4 Rp/kWh$_{Ho}$) und den Gestehungskosten für die Aufbereitungsanlage (Kapitaldienst, Betrieb und Unterhalt) von 3.5-6.0 Rp/kWh$_{Ho}$.

In Zukunft wird die ARA gemäss Botschaft des Bundesrates zum ersten Mass-

nahmenpaket der Energiestrategie 2050 keine KEV Entschädigung mehr erhalten. Folglich resultiert damit bei der Variante Einspeisung eine Einsparung für die ungedeckten Mehrkosten des BHKW Stromes.

Somit bleibt mit einer Entschädigung von 0-4.0 Rp/kWh$_{Ho}$ für das unaufbereitete Klärgas die Wirtschaftlichkeit sowohl für den ARA Betreiber, als auch Einspeiser und Gasabnehmer gewährleistet.

Bei der dezentraler Verstromung des eingespeisten Klärgases ist die Wirtschaftlichkeit nur gegeben, wenn sich der Klärgaspreis an den effektiven Gestehungskosten orientiert und eine KEV Entschädigung gemäss EnV Anhang 1.5 bzw. Ökostrom in Grössenordnung von 20-26.5 Rp/kWh weiterhin bestehen bleibt.

Zusammenfassend

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die betrachteten ARA bereits heute ökologisch und energietechnisch sinnvoll handeln, indem sie ihr Biogas im BHKW verstromen und damit einen Grossteil ihres Strombedarfs selbst produzieren. Allerdings wird ein Teil des Biogases heute ungenutzt über die Fackel vernichtet. Auch die BHKW-Abwärme kann auf den meisten ARA nicht vollständig genutzt werden.

Auf dem Hintergrund der Zielsetzungen einer nachhaltigen Energienutzung und des Klimaschutz ist eine möglichst vollständige Nutzung der Energie im Klärgas anzustreben, insbesondere auch der Wärme, die bei der Verbrennung entsteht.

Zwar bewirkt die Biogaseinspeisung auf der ARA energetisch meist eine leichte Verschlechterung. Weitet man die Systemgrenzen im Sinne einer gesamtheitlicheren Betrachtung aber auf den Nutzer aus, was im Hinblick auf die genannte Zielsetzung zwingend ist, schneidet die Biogaseinspeisung energetisch besser ab. Noch grösser sind die Vorteile der Biogaseinspeisung im Vergleich zum BHKW auf der ARA bei der Reduktion von Treibhausgasemissionen.

Damit bestätigen die Ergebnisse der vorliegende Studie auch die zentrale Schlussfolgerung des aktuell erschienenen Berichtes „Energiegrundsätze für die ARA im Kanton Bern“des Amtes für Wasser und Abfall des Kantons Bern:

„Werden die Massnahmen der vollständigen und effizienten Biogasnutzung konsequent umgesetzt, wird dies zu einer Verschiebung von der heute verbreiteten Verstromung zur Biogasaufbereitung und -einspeisung führen“ (siehe [5], Bericht AWA Bern 2015).

7.2 Ausblick / Vision

Weiteres Potential

In der vorliegenden Betrachtung wurden die industriellen ARA, Steigerungen des Klärgasertrags durch die Beimischung von Co-Substraten, kleine ARA / ARA ohne Erdgasnetz und die Kompogasanlagen nicht berücksichtigt:

- Bei den 13 industriellen ARA (Monthey, Vernier-Ouest, Papierfabrik TELA, Zweifel Pommy-Chips AG, R. Bauernfeind Papierfabrik AG, Diwisa SA, TMF Extraktionswerk AG, L. Ditzler AG, Emmi Milch AG, Pomdor AG, Cilander und Mineralquelle Zurzach AG) ist ein zusätzliches Potential von schätzungsweise rund 7.5 Mio. Nm^3/a für die Biogaseinspeisung vorhanden.
- In den 15 Kompogasanlagen wird das zusätzliche Potential für die Biogaseinspeisung auf 6-8 Mio. Nm^3/a geschätzt.
- Zusätzliches Potential bietet der Einsatz von weiteren Co-Substraten. Einerseits sollen die Co-Substrate nur auf denjenigen ARA eingesetzt werden, welche die Energie auch vollständig nutzen (siehe Studie AWA Bern 2015 [5]), andererseits kann die Co-Substratmenge generell erhöht werden, um die Biogasmenge zu steigern.
- Das zusätzliche Potential der ARA mit weniger als 30'000 EWG und keinem Erdgasnetz in der Gemeinde schätzen wir auf 25 Mio. Nm^3/a. Mindestens eine teilweise Nutzung dieses Biogases könnte z.B. mittels dezentralen Biogastankstellen, erreicht werden.

Nutzung Abwasser-Abwärme für Externe

Eng verknüpft mit der Biogaseinspeisung ist eine Abwasserwärmenutzung zur Deckung des ARA-eigenen Wärmebedarfs. Nutz man bereits Abwasserwärme auf der ARA, ist es naheliegend, dass das riesige ungenutzte Abwärmepotential auch für ARA-externe Bezüger nutzbar gemacht und mittels eines Wärme- bzw. Anergienetzes an diese verteilt wird. Biogaseinspeisung und ARA-interne und –externe Abwasserwärmenutzung ergänzen sich also energietechnisch optimal, was unter den Themen Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit zu vorteilhaften Win-win-Situationen führt.

Power-to-gas

Denkt man noch weiter in Richtung gesamtheitlich integrierte und optimierte Energiesysteme wird in Zukunft auch die Nutzung des CO_2 im Klärgas ein Thema werden. Bereits heute gibt es im Ausland sogenannte „Power to gas" Anlagen im industriellen Massstab, welche durch Anreicherung von Wasserstoff (H_2) im Klärgas das CO_2 zu synthetischem Methan umwandeln. Diese Entwicklungen sind bezüglich dieser zukunftsgerichteten Energieumwandlung unbedingt weiter zu verfolgen.

8 Abkürzungen und Glossar

8.1 Abkürzungen

ARA	Abwasserreinigungsanlage(n)
BHKW	Blockheizkraftwerk
EW	Einwohnerwert
EWG	Einwohnergleichwert
EWG_m	Mittlere Belastung an Einwohnergleichwerten
FW	Fernwärme
H_u	Heizwert (= unterer Heizwert)
HT	Hochtemperatur
KS	Klärschlamm
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
MGT	Mikrogasturbine
MT	Mitteltemperatur
NEP	Neue Energiepolitik
NT	Niedertemperatur
TS	Trockensubstanz
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung
WV	Wärmeverbund

8.2 Glossar

Anergie	Als Anergie wird der Bestandteil einer Energie bezeichnet, der in einem Prozess keine Arbeit verrichten kann. Die Größe der Anergie ist vom thermischen Zustand der jeweiligen Umgebung und von den Charakteristika des Prozesses abhängig. Im vorliegenden Bericht wird die Abwärme im Abwasser als Anergie bezeichnet.
Biogas	Unter Biogas werden sämtliche Gase verstanden, die als Folge einer biologischen oder chemischen Umwandlung aus Biomasse entstehen können.
BHKW	Das Blockheizkraftwerk (BHKW) ist eine modular aufgebaute Anlage zur Gewinnung von Strom und Wärme (z.B. Gasmotor oder Mikrogasturbine).
Co-Substrat	Co-Substrate bezeichnen Stoffe, die dem üblichen Gärsubstrat (hier Klär-

	schlamm) im Gärprozess zugeführt werden, um die Biogasproduktion zu steigern.
Endenergie	Endenergie ist der nach Energiewandlungs- und Übertragungsverlusten übrig gebliebene Teil der Primärenergie, welcher beim Endkunden, z.B. zur Erzeugung von Wärme, genutzt werden kann.
Energiefluss-diagramm	Ein Energieflussdiagramm ist eine graphische Darstellung von Mengen- bzw. Energieflüssen. Die Energien werden dabei durch energieproportional dicke Pfeile dargestellt.
EW	Die Summe aus Einwohnerzahl (EZ) und Einwohnergleichwerten (EGW) ergibt den Einwohnerwert EW. Es gilt: EW = EZ + EGW. Die Einheit für den Einwohnerwert, die Einwohnerzahl und dem Einwohnergleichwert ist [E] (Einwohner).
EWG	Der Einwohnergleichwert dient als Mass für die Schmutzfracht, die mit gewerblichem Abwasser in eine Kläranlage gelangt. Er vergleicht die Schmutzfracht eines gewerblichen Abwassers mit der Schmutzfracht im häuslichen Abwasser eines einzelnen tatsächlichen Einwohners. Wird zur Ermittlung des EGW der Biochemische Sauerstoffbedarf (BSB) herangezogen, teilt man die mittlere tägliche Schmutzfracht im gewerblichen Abwasser eines Betriebes durch die 60 g/d, die ein Einwohner verursacht. Zur Ermittlung des Einwohnergleichwertes kann auch der Chemische Sauerstoffbedarf 120g E*d (CSB) herangezogen werden.
Klärgas	Als Klärgas oder Faulgas wird ein Biogas bezeichnet, das durch die Fermentation/Faulung von Klärschlamm in Abwasserreinigungsanlagen entsteht.
Membran-technologie	Technologie zur Aufbereitung von Biogas für die Einspeisung ins Erdgasnetz mittels permeabler Membranen.
Methanschlupf	Als Methanschlupf wird diejenige Methanmenge bezeichnet, die während des Aufbereitungs- und Einspeiseprozesses in die Atmosphäre entweicht. Ausgangswert für die Angabe (100%) ist das Methan im Rohbiogas, d.h. dem Biogas, das in die Aufbereitungsanlage eintritt. Die Bezeichnung Restmethan bezieht sich ausschliesslich auf Aufbereitungs- und Einspeiseanlagen. Der Methanausstoss aus der der Aufbereitung vor- oder nachgelagerten Prozessen wird als Methan-„Emission" bezeichnet. In der vorliegenden Studie werden die Methan-„Emissionen" der BHKW-Anlage ebenfalls als Methanschlupf bezeichnet.
Nutzungsgrad	Der Nutzungsgrad einer Energieanlage gibt das Verhältnis von maximal nutzbarer zur zugeführten Energie an. Im Unterschied zum Wirkungsgrad (welcher einen momentanen Zustand zeigt), gilt der Nutzungsgrad über eine bestimmte

Zeit (z.B. über ein Jahr). Im betrachteten Zeitraum sind auch Leerlauf-, Anfahr- und Abfahrzeiten und -verluste enthalten.

Primärenergie

Als Primärenergie bezeichnet man die Energie, die mit den ursprünglich vorkommenden Energieformen oder Energiequellen zur Verfügung steht, etwa als Brennstoff (z. B. Erdgas), aber auch Energieträger wie Sonne, Wind oder Kernbrennstoffe. Primärenergie kann durch einen (mit Verlusten behafteten) Umwandlungsprozess in Sekundärenergie umgewandelt werden. Primär- oder Sekundärenergie wird nach Übertragungsverlusten zu vom Verbraucher nutzbarer Endenergie.

Treibhausgase

Treibhausgase sind strahlungsbeeinflussende gasförmige Stoffe (z.B. CO_2, Methan, Lachgas, etc.) in der Luft, die zum Treibhauseffekt beitragen. Sie absorbieren einen Teil der vom Boden abgegebenen Infrarotstrahlung, die sonst ins Weltall entweichen würde.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich Primärenergie und Treibhausgasemissionen Ist-Zustand und Potential 5
Abbildung 2:Vergleich Treibhausgasemissionen Ist-Zustand und Potential 9
Abbildung 3: Vergleich ARA Wärmebedarf und Wärmeproduktion mit BHKW 14
Abbildung 4:Ist-Werte Stromnutzungsgrad ARA-BHKW 15
Abbildung 5: Potential Prozess-Wärmerückgewinnung auf ARA 16
Abbildung 6: Betrachtetes Gesamtsystem (äussere Systemgrenze) mit ARA und Endnutzer dezentral 17
Abbildung 7: Energieflussdiagramm – Nutzung als Treibstoff 19
Abbildung 8: Energieflussdiagramm – Nutzung zur Wärmeerzeugung 19
Abbildung 9: Energieflussdiagramm – Nutzung in dezentralen BHKW 20
Abbildung 10: Energieflussdiagramm – Mischnutzung 20%/20%/60% 21
Abbildung 11: Nutzerprofil ARA-BHKW 21
Abbildung 12: Mögliche Nutzungen Biogas 25
Abbildung 13: ARA 1, Energieflussdiagramm Situation heute 26
Abbildung 14: ARA 1, Energieflussdiagramm mit Biogaseinspeisung (gemischte Nutzung) 28
Abbildung 15: ARA 1, Vergleich Primärenergie, Treibhausgasemissionen 29
Abbildung 16: ARA 2, Energieflussdiagramm Situation heute 30
Abbildung 17: ARA 2, Energieflussdiagramm mit Biogaseinspeisung (gemischte Nutzung) 31
Abbildung 18: ARA 2, Vergleich Primärenergie, Treibhausgasemissionen 32
Abbildung 19: ARA 3, Energieflussdiagramm Situation heute 33
Abbildung 20: ARA 3, Energieflussdiagramm mit Biogaseinspeisung (gemischte Nutzung) 34
Abbildung 21: ARA 3, Vergleich Primärenergie, Treibhausgasemissionen 35
Abbildung 22: ARA 3 mit KVA-Abwärme, Vergleich Primärenergie, Treibhausgasemissionen 36
Abbildung 23: Schweizerkarte aller ARA-Standorte 39
Abbildung 24: Schweizerkarte aller Gemeinden mit Erdgasnetz 40
Abbildung 25: Schweizerkarte aller Gemeinden mit ARA > 30'000 EWG und Erdgasnetz 41
Abbildung 26: ARA-Grössen Schweizer Potential 41
Abbildung 27: Klärgasnutzung Ist-Zustand 42
Abbildung 28: Energieflussdiagramm Ist-Zustand 42
Abbildung 29: Klärgasnutzung Schweizer Potential Biogaseinspeisung 43

Abbildung 30: Energieflussdiagramm Schweizer Potential Biogaseinspeisung (gemischte Nutzung) 44
Abbildung 31: Vergleich Primärenergie und Treibhausgasemissionen Ist-Zustand und Potential 45
Abbildung 32: Spezifische Stromgestehungskosten ARA-BHKW 46
Abbildung 33: Anlagenbeispiel mit 1 Mio. Nm^3/a Klärgas 47
Abbildung 34 Zuständigkeiten KEV Entschädigung für dezentrale Nutzung WKK von Biogas 49
Abbildung 35: Treibhausgasemissionen Schweiz, Bafu 51
Abbildung 36: Einfluss verschiedener Parameter auf Primärenergie und Treibhausgas 52

10 Anhang

10.1 Anhang 1: ARA 1 Energieflussdiagramm (Stand heute)

10.2 Anhang 2: ARA 1 Energieflussdiagramm (Einspeisung Biogas)

10.3 Anhang 3: ARA 1 Primärenergie und Treibhausgasemissionen

10.4 Anhang 4: ARA 2 Energieflussdiagramm (Stand heute)

10.5 Anhang 5: ARA 2 Energieflussdiagramm (Einspeisung Biogas)

10.6 Anhang 6: ARA 2 Primärenergie und Treibhausgasemissionen

10.7 Anhang 7: ARA 3 Energieflussdiagramm (Stand heute)

10.8 Anhang 8: ARA 3 Energieflussdiagramm (Einspeisung Biogas)

10.9 Anhang 9: ARA 3 Primärenergie und Treibhausgasemissionen

10.10 Anhang 10: Energieflussdiagramm Ist-Zustand

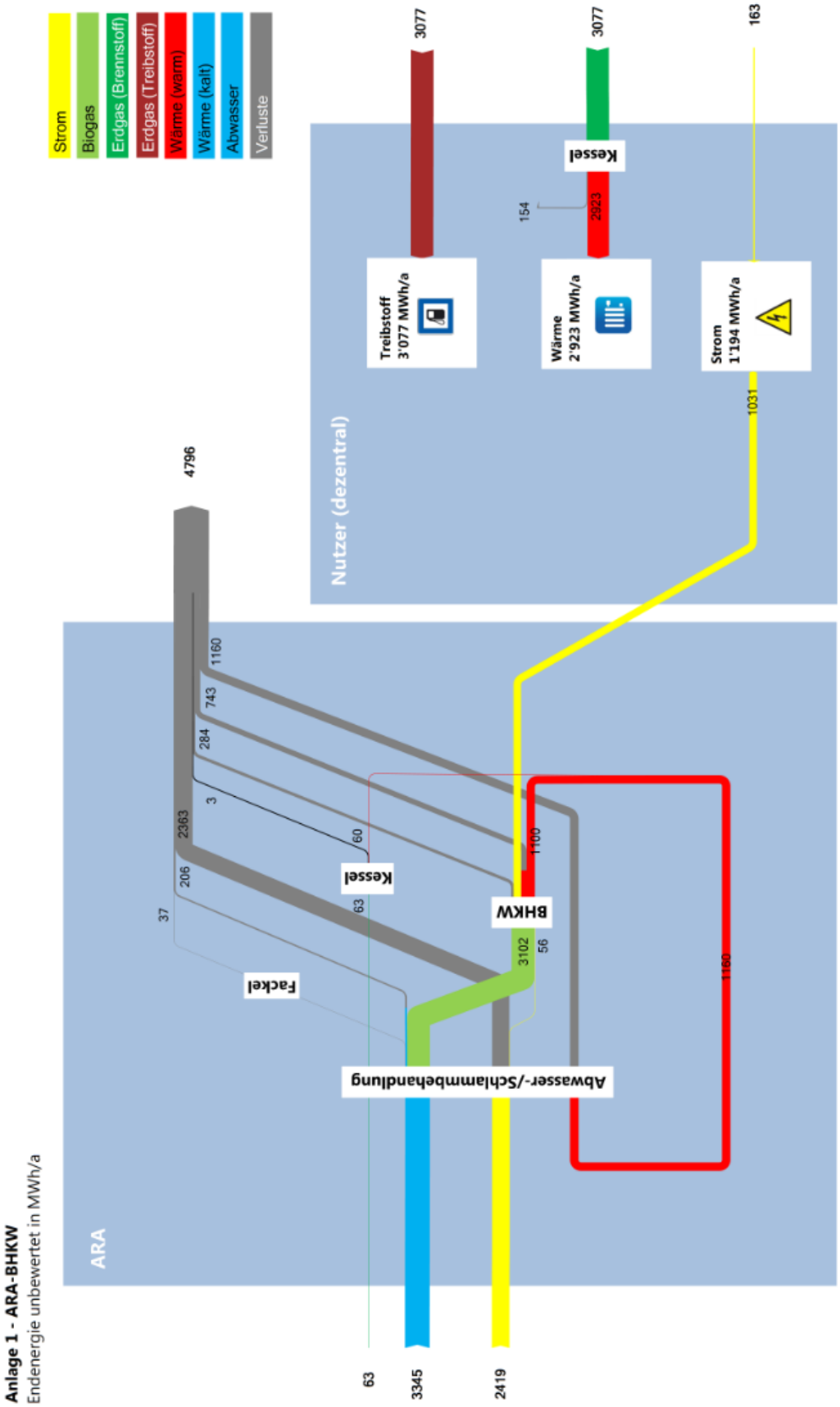
10.11 Anhang 11: Energieflussdiagramm Schweizer Potential

10.12 Anhang 12: Primärenergie und Treibhausgasemissionen Potential

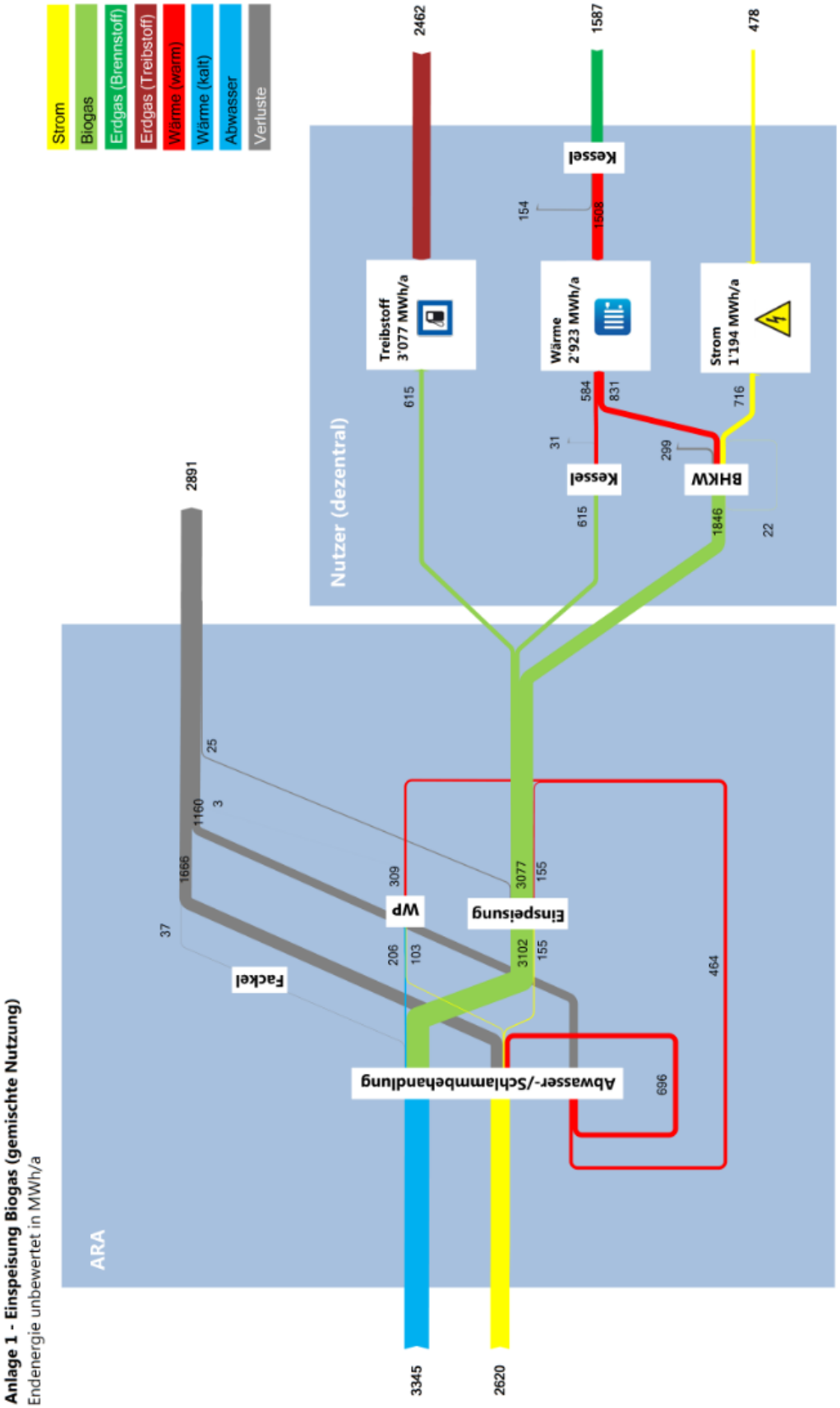
10.13 Anhang 13: Berechnung Faktoren Strommix

10.14 Anhang 14: Berechnungen

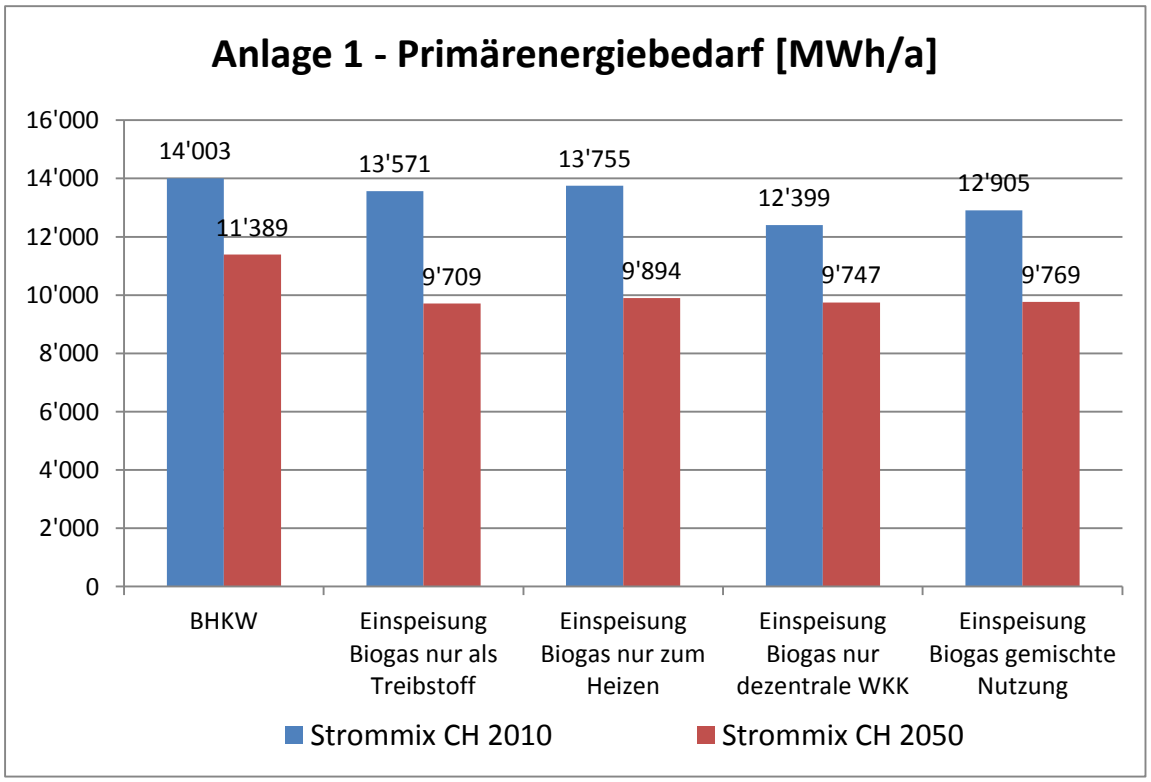
10.1 Anhang 1: ARA 1 (83'000 EW) Energieflussdiagramm (Stand heute)

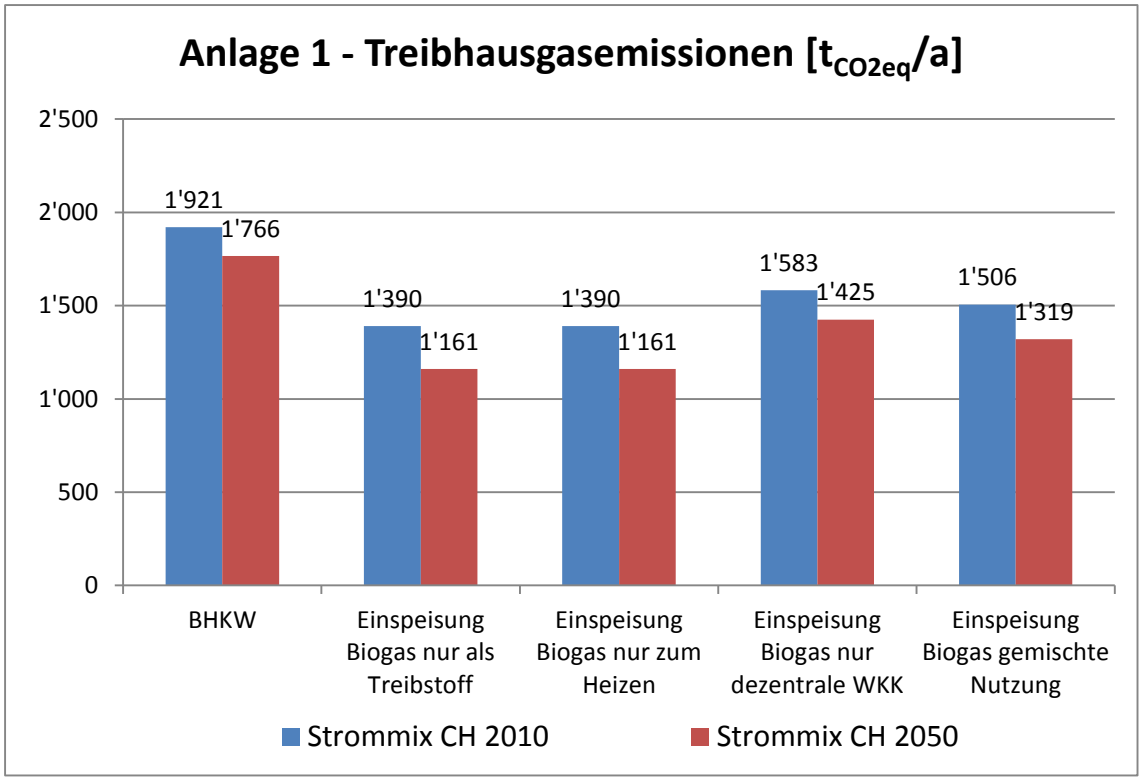


10.2 Anhang 2: ARA 1 (83'000 EW) Energieflussdiagramm (Einspeisung Biogas)

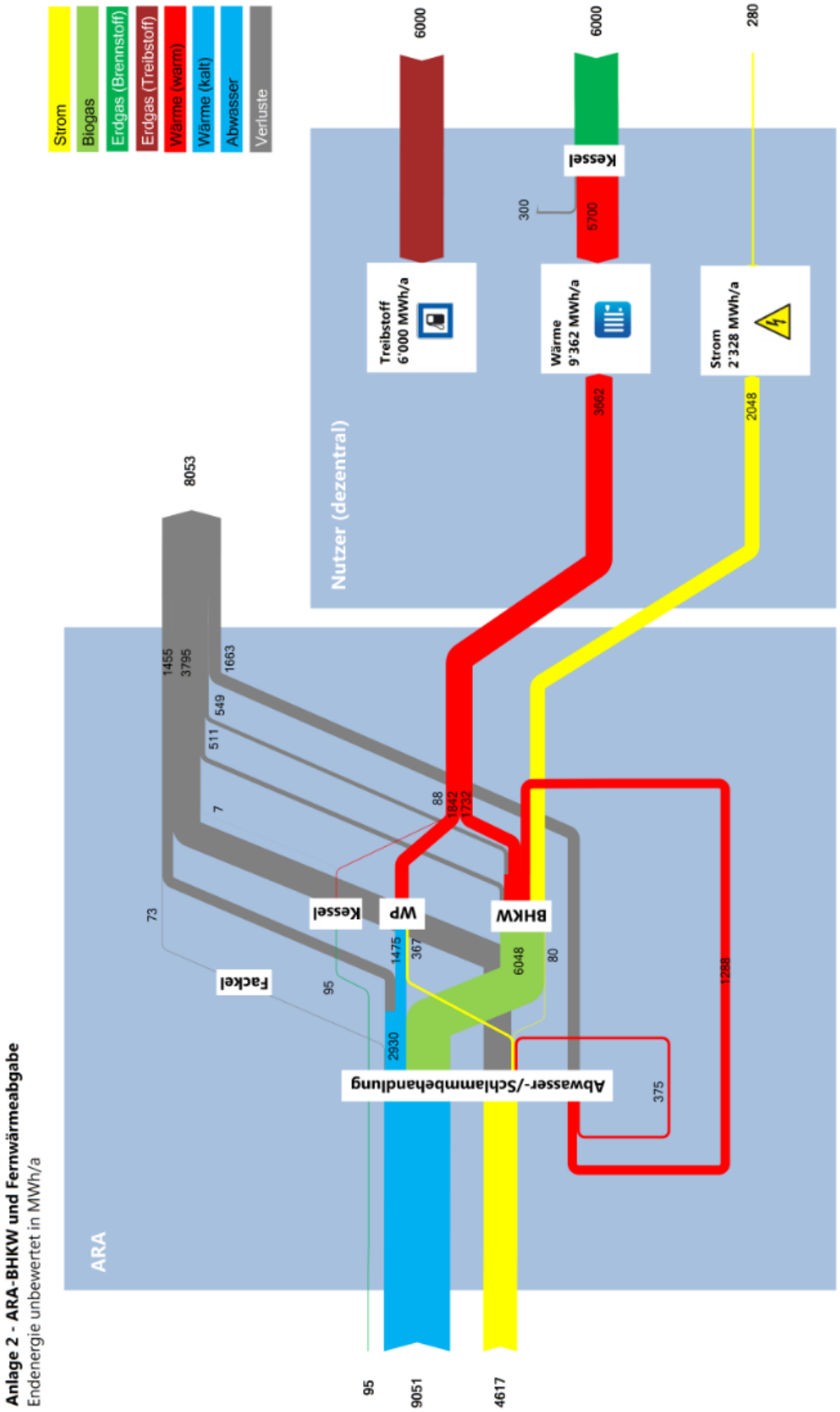


10.3 Anhang 3: ARA 1 (83'000 EW) Primärenergie und Treibhausgasemissionen



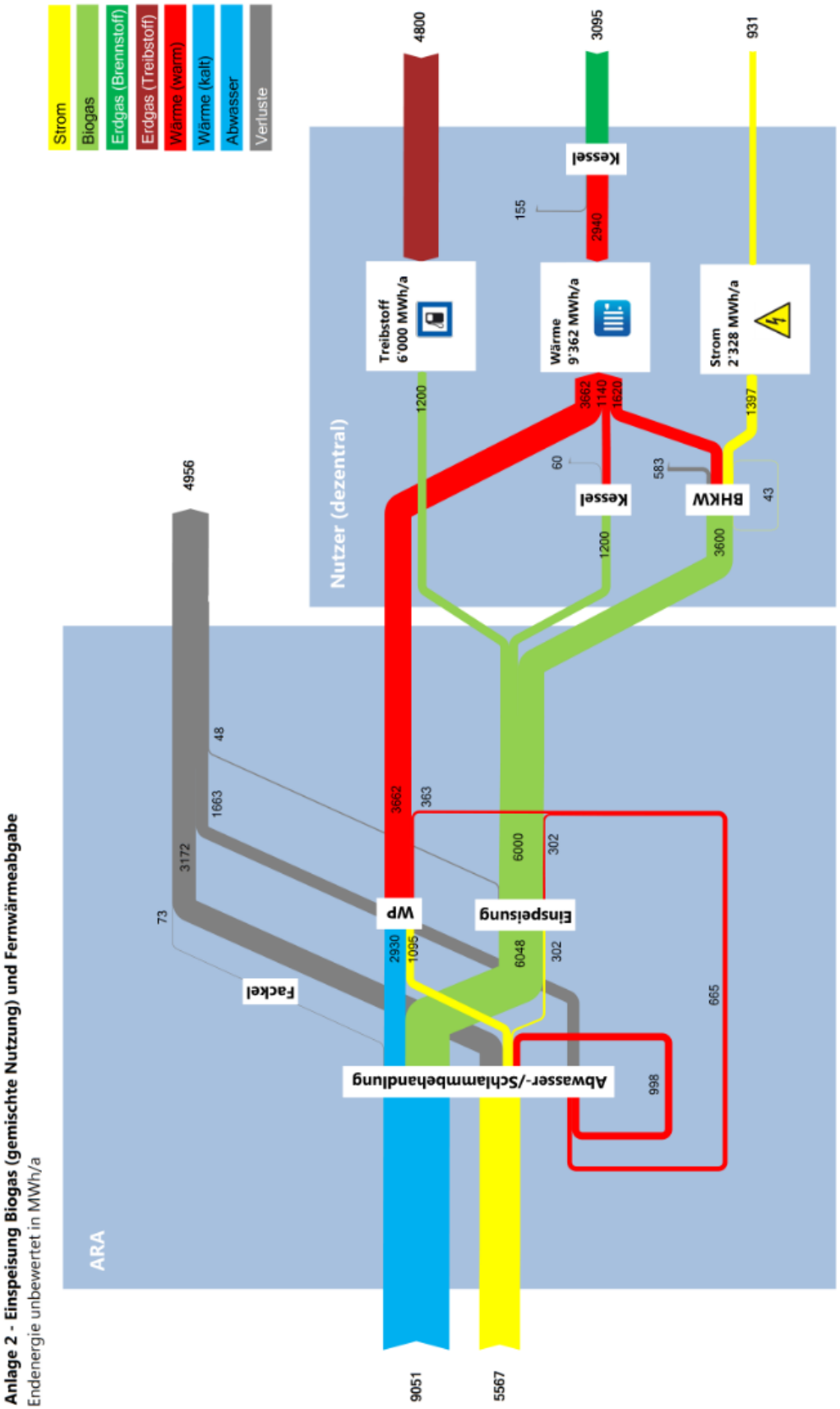


10.4 Anhang 4: ARA 2 (145'000 EW) Energieflussdiagramm (Stand heute)

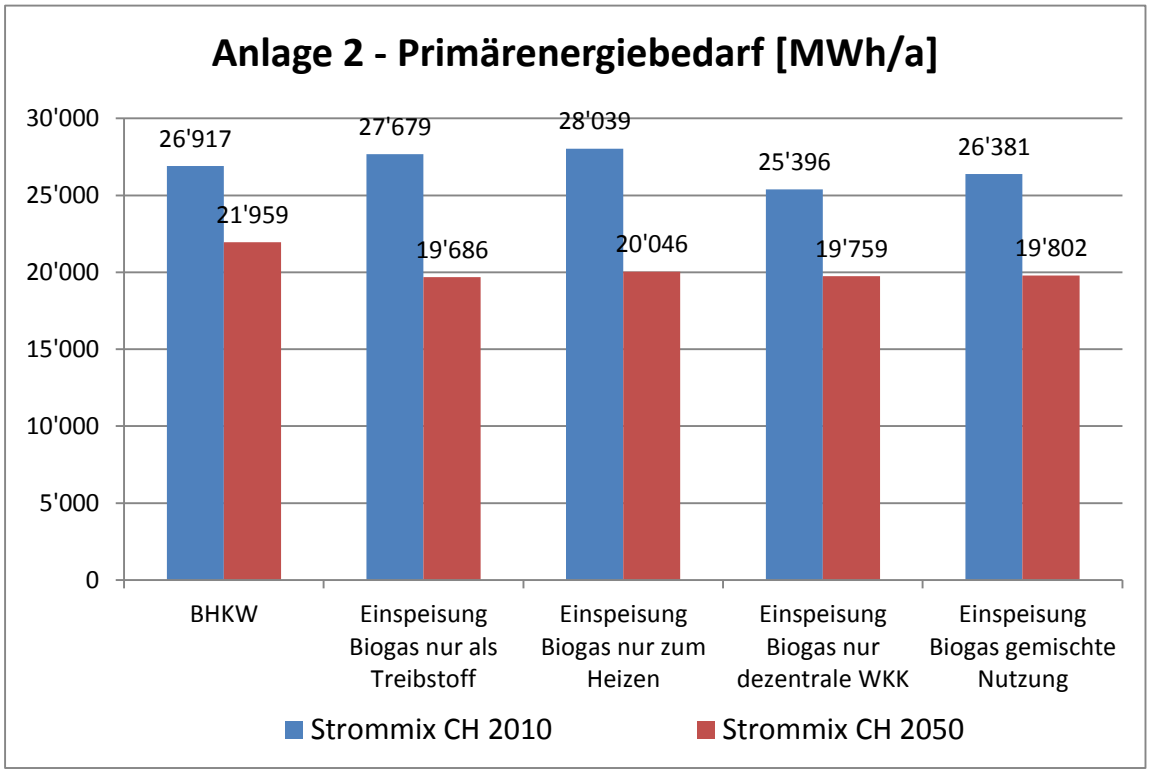


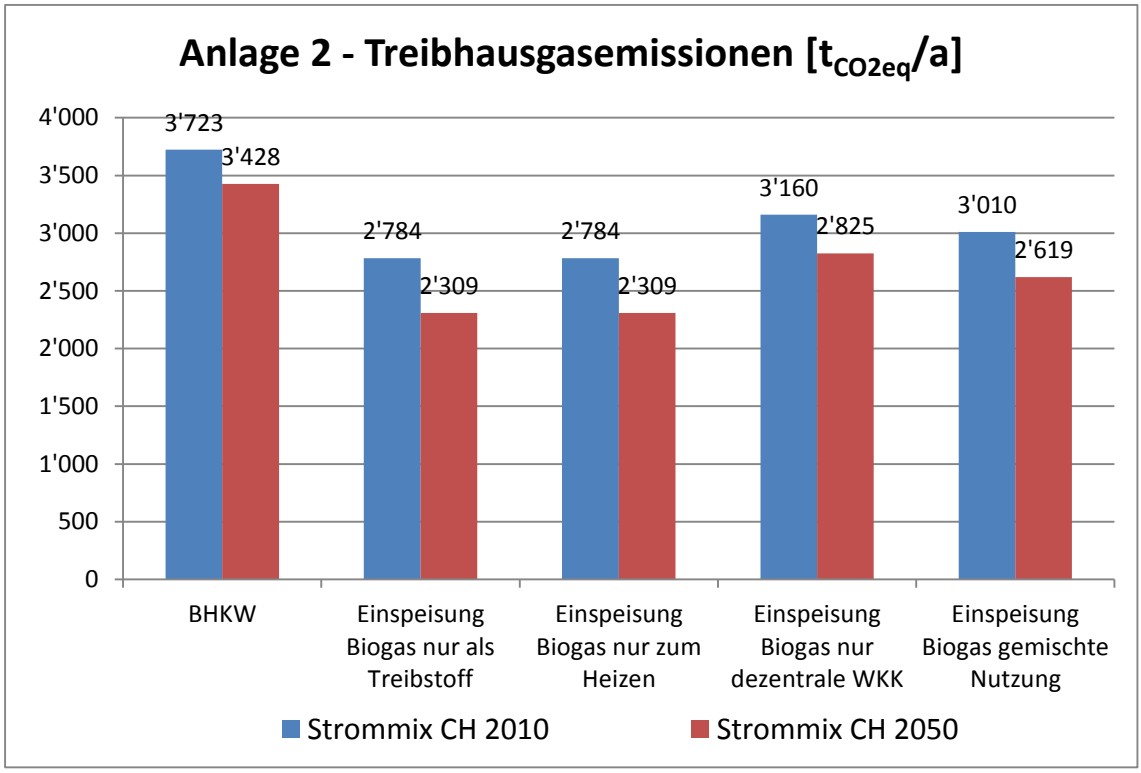
Anlage 2 - ARA-BHKW und Fernwärmeabgabe
Endenergie unbewertet in MWh/a

10.5 Anhang 5: ARA 2 (145'000 EW) Energieflussdiagramm (Einspeisung Biogas)

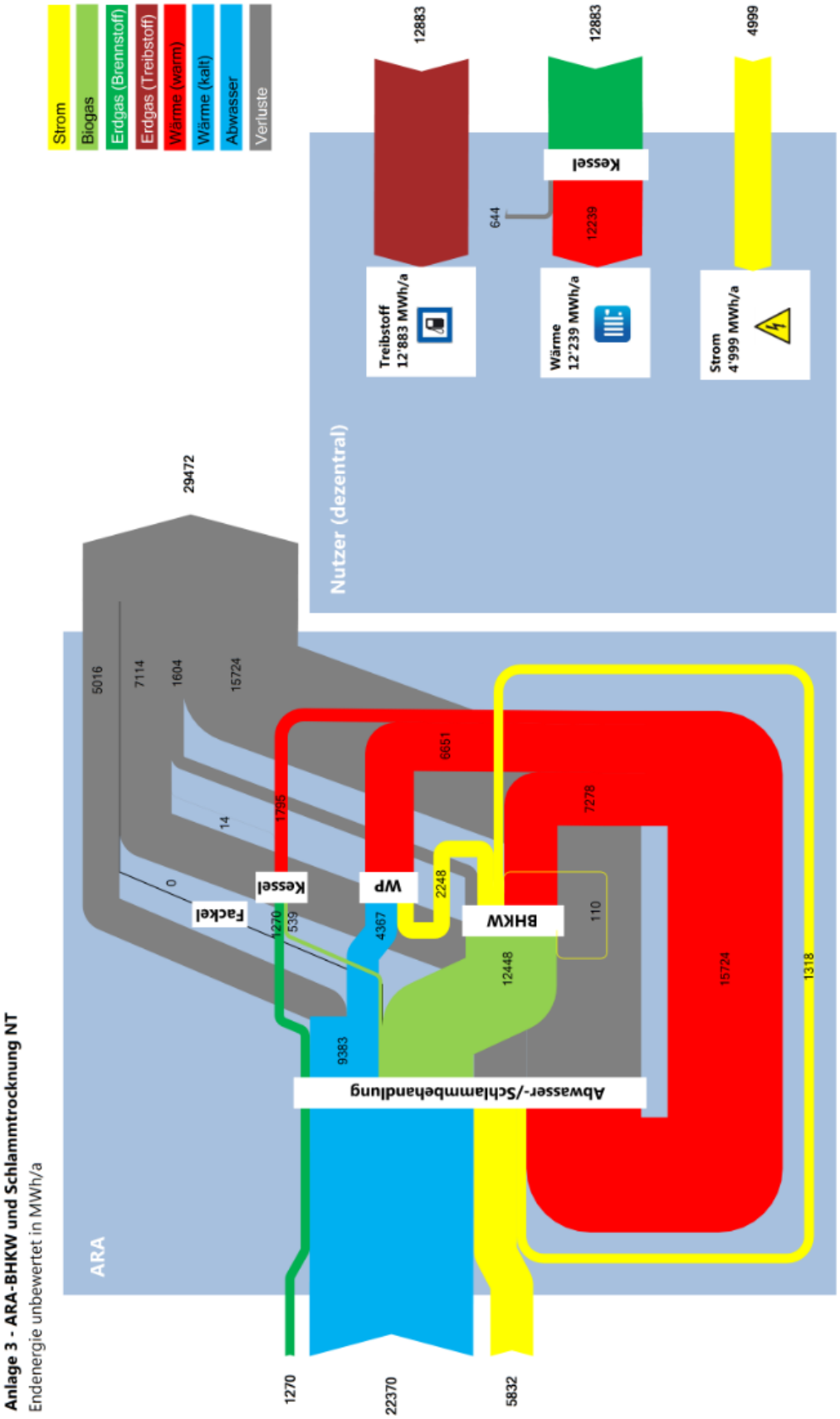


10.6 Anhang 6: ARA 2 (145'000 EW) Primärenergie und Treibhausgasemissionen

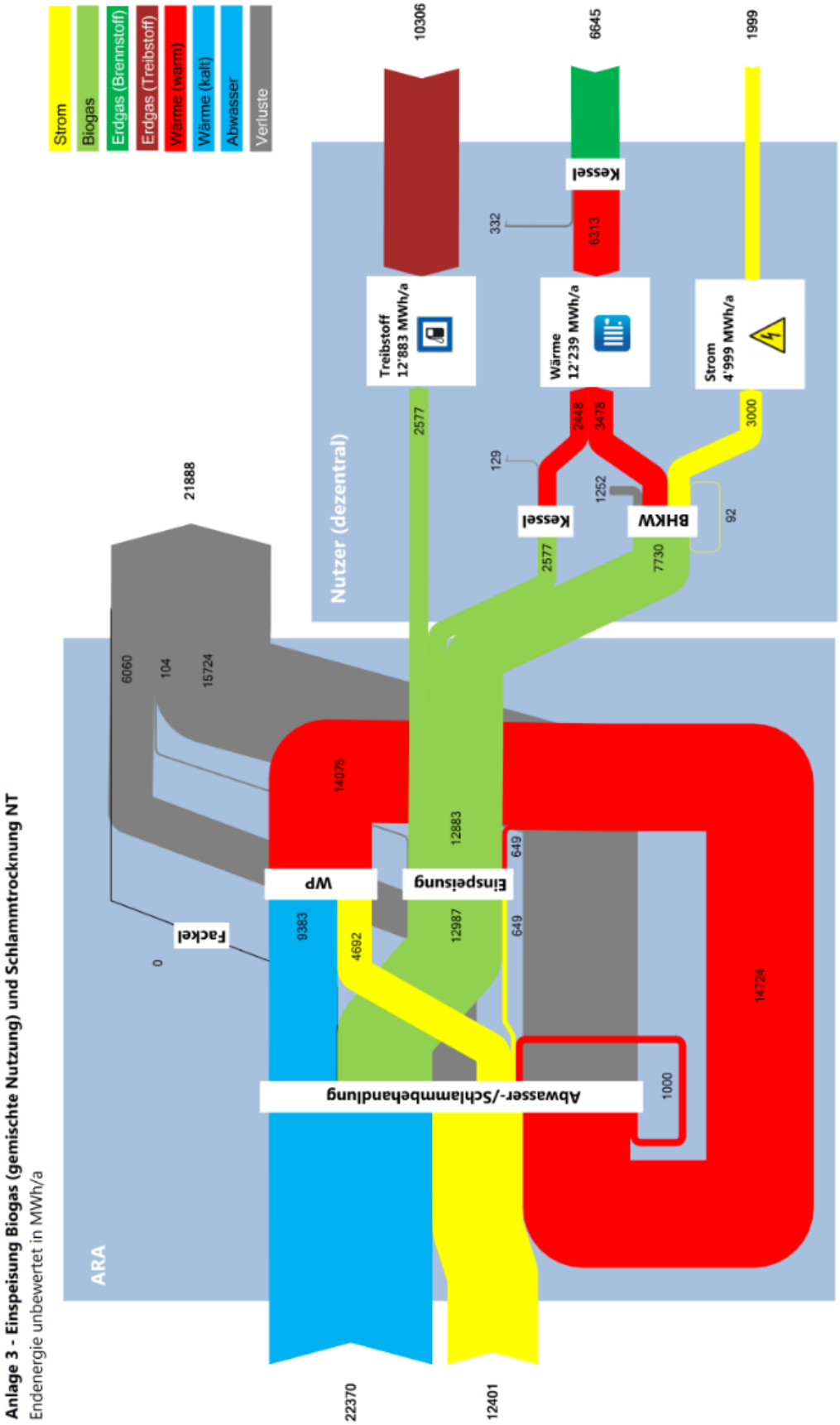




10.7 Anhang 7: ARA 3 (200'000 EW) Energieflussdiagramm (Stand heute)

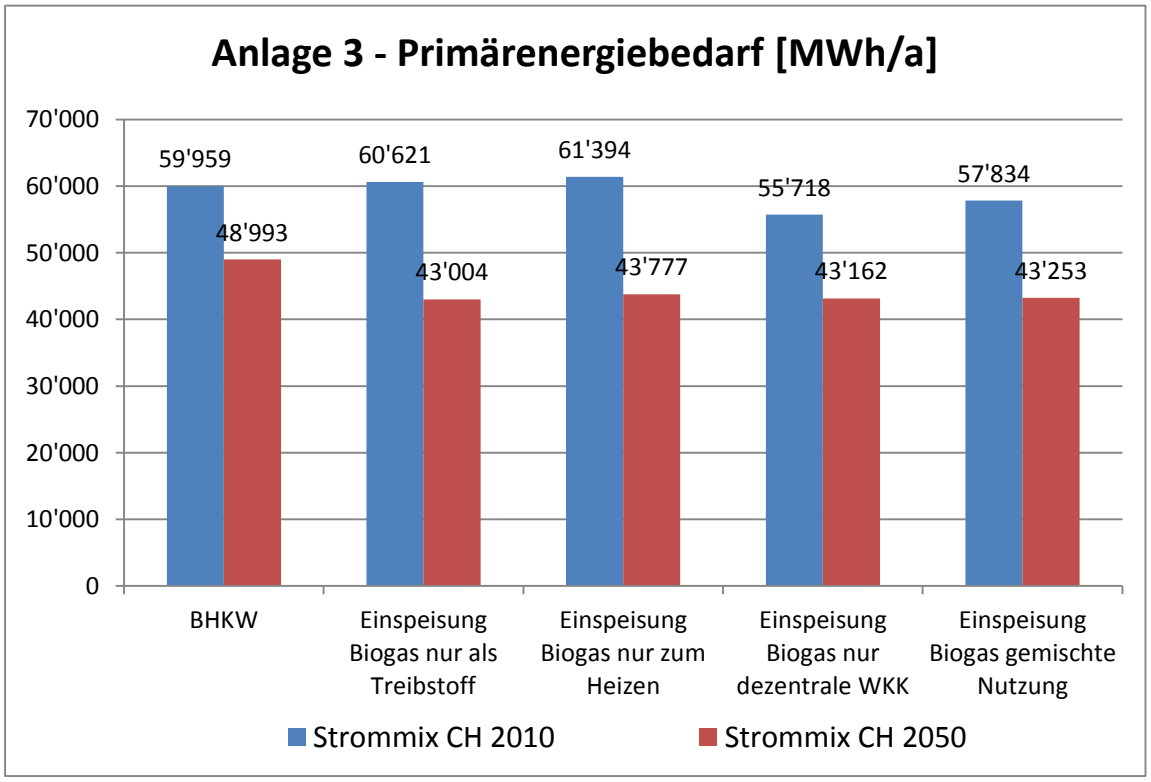


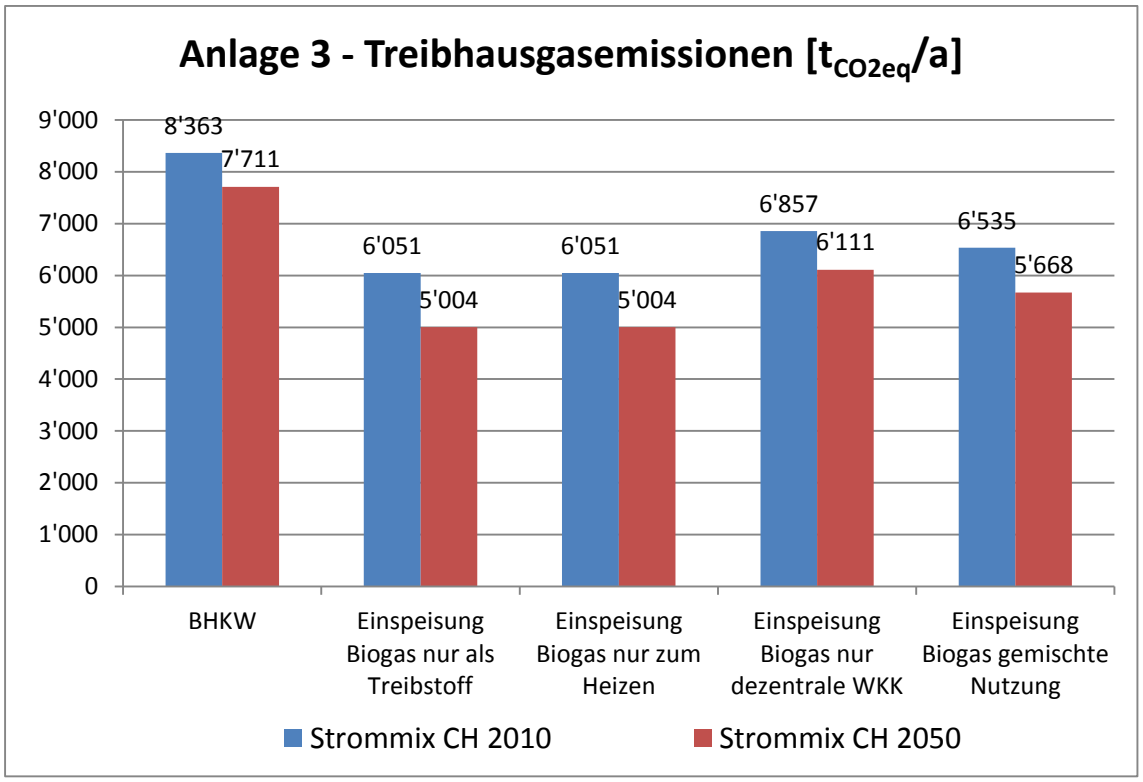
10.8 Anhang 8: ARA 3 (200'000 EW) Energieflussdiagramm (Einspeisung Biogas)



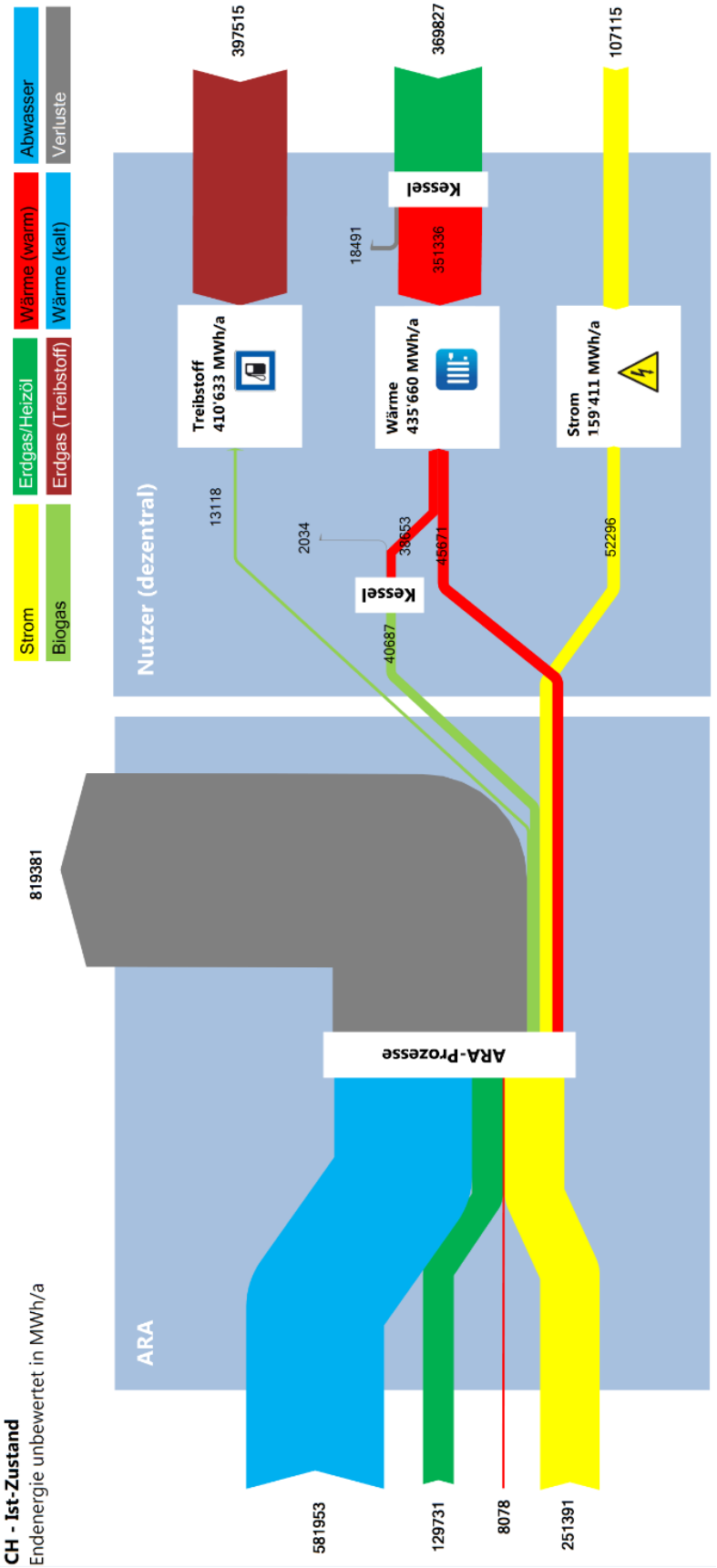
Anlage 3 - Einspeisung Biogas (gemischte Nutzung) und Schlammtrocknung NT
Endenergie unbewertet in MWh/a

10.9 Anhang 9: ARA 3 (200'000 EW) Primärenergie und Treibhausgasemissionen

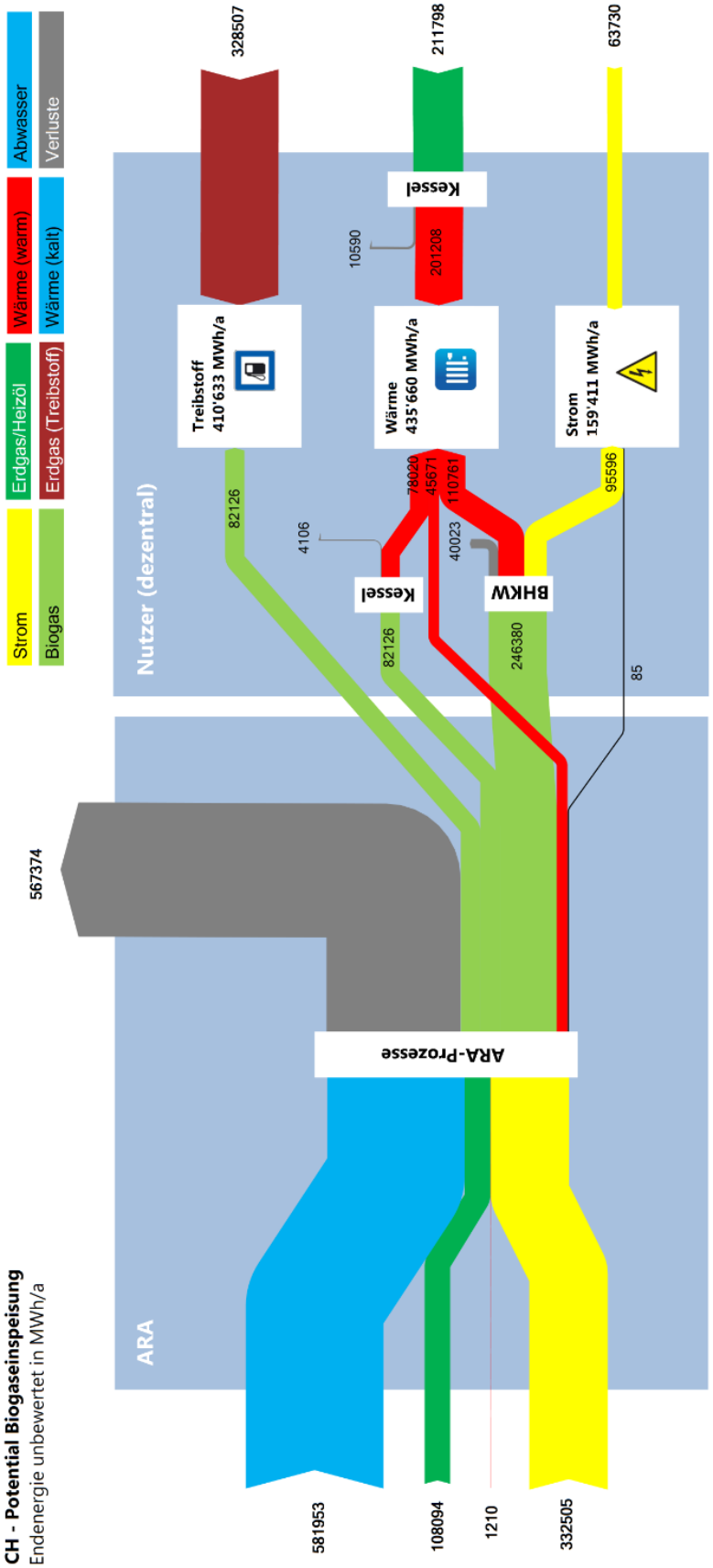




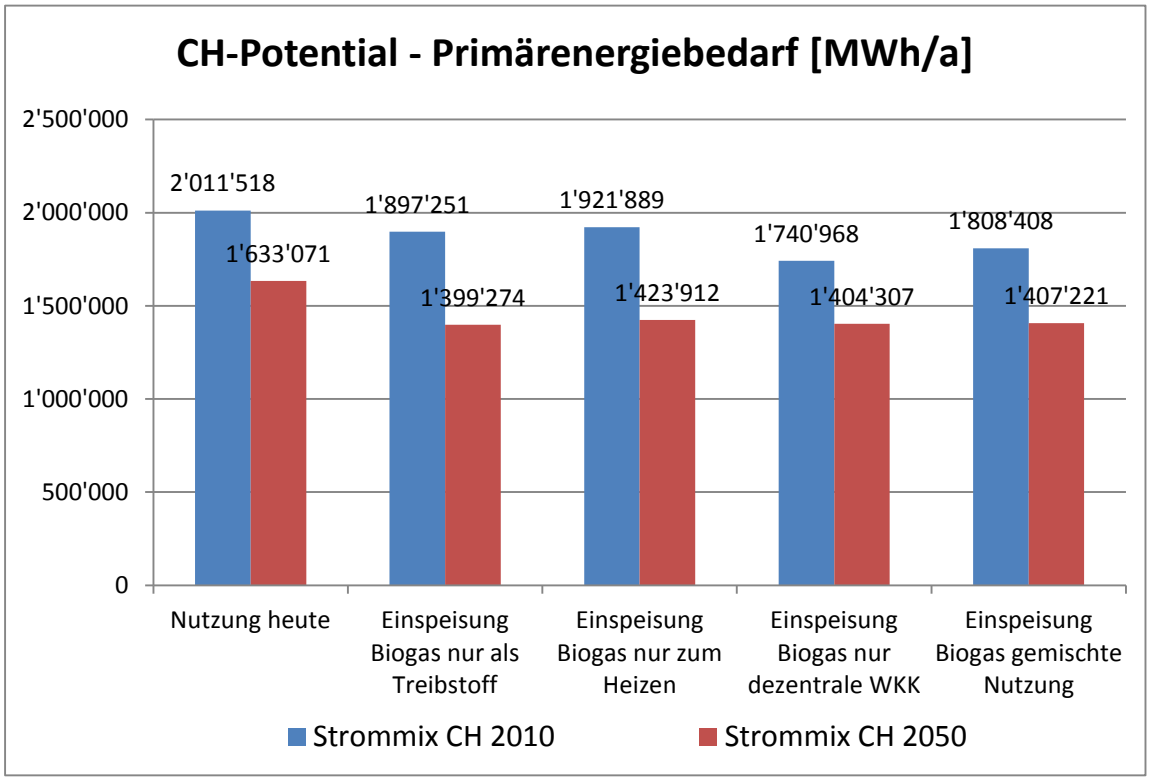
10.10 Anhang 10: Energieflussdiagramm CH Ist-Zustand

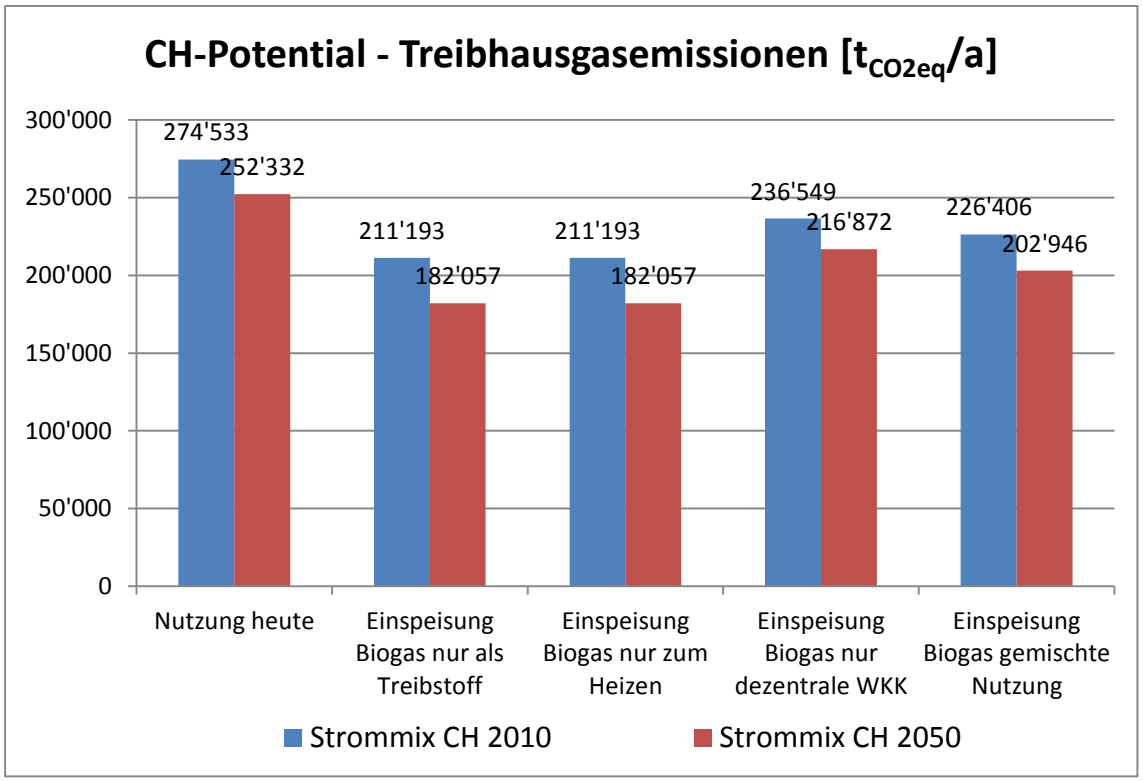


10.11 Anhang 11: Energieflussdiagramm CH Potential Biogaseinspeisung



10.12 Anhang 12: Primärenergie und Treibhausgasemissionen Potential





10.13 Anhang 13: Berechnung Faktoren Strommix

Faktoren anhand Stromerzeugung Neue Energiepolitik			ESU	NEP Anteile 2010	NEP Anteile 2050	
Primäerenergiefaktoren	Strom fossil GuD	MJ_{eq}/MJ	2.3400	0%	0%	0% Erdgas GuD
	Strom fossil WKK	MJ_{eq}/MJ	3.2900	3%	5%	5% BHKW Gas
	Wasser	MJ_{eq}/MJ	1.2200	44%	56%	
	PV	MJ_{eq}/MJ	1.6200	0%	16%	
	Wind	MJ_{eq}/MJ	1.3200	0%	6%	
	Geothermie	MJ_{eq}/MJ	3.3600	0%	6%	
	Rest erneuerbarer Strom	MJ_{eq}/MJ	1.6600	2%	6%	Mittel Holz-HKW, Biogas, Landwirtschaft
	KKW	MJ_{eq}/MJ	4.0700	31%	0%	
	Import	MJ_{eq}/MJ	3.5400	21%	4%	UTCE-Mix
	gewichtetes Mittel	**MJ_{eq}/MJ**		**2.6548**	**1.6423**	
Treibhausgasfaktoren	Strom fossil GuD	kg_{CO2eq}/MJ	0.1350	0%	0%	0% Erdgas GuD
	Strom fossil WKK	kg_{CO2eq}/MJ	0.2050	3%	5%	5% BHKW Gas
	Wasser	kg_{CO2eq}/MJ	0.0040	44%	56%	
	PV	kg_{CO2eq}/MJ	0.0280	0%	16%	
	Wind	kg_{CO2eq}/MJ	0.0080	0%	6%	
	Geothermie	kg_{CO2eq}/MJ	0.0090	0%	6%	
	Rest erneuerbarer Strom	kg_{CO2eq}/MJ	0.0613	2%	6%	Mittel Holz-HKW, Biogas, Landwirtschaft
	KKW	kg_{CO2eq}/MJ	0.0050	31%	0%	
	Import	kg_{CO2eq}/MJ	0.1650	21%	4%	UTCE-Mix
	gewichtetes Mittel	**kg_{CO2eq}/MJ**		**0.0447**	**0.0280**	

10.14 Anhang 14: Berechnungen

Randbedingungen energetisch	Einheit	ARA-Anlagentyp 1		ARA-Anlagentyp 2 mit externem Wärmeverbund		ARA-Anlagentyp 3 mit ARA-WP und Trocknung		Schweizer Potential		Bemerkungen
		ARA-BHKW	Biogas-einspeisung	ARA-BHKW	Biogas-einspeisung	ARA-BHKW	Biogas-einspeisung	Ist-Zustand heute	Biogas-einspeisung	
Energietechnische Randbedingungen										
Klärgasaufbereitung mittels						Membrantechnologie				
Nutzungsgrad Gaskessel	%					95.0%				Erfahrungswert Durena
Nutzungsgrad BHKW (Strom)	%					40.0%				Erfahrungswert Durena
Nutzungsgrad BHKW (Wärme)	%					45.0%				Erfahrungswert Durena
JAZ Abwasser-Wärmepumpe	-					3.0				Erfahrungswert Durena
Methanschlupf Biogasaufbereitung	%					0.8%				Annahme Durena
Methanschlupf BHKW	%					0.5%				Annahme Durena
Übrige Kenndaten Wärmetechnik und Methananreicherung gemäss Annahmen/Erfahrungswerten Durena bzw. Lieferantenangaben										
Primärenergiefaktoren: Energieaufwand zur Bereitstellung der Energie am Gebäudeeintritt										
Fernwärme (Abwasserwärme)	MJ_{eq}/MJ					0				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Erdgas (Brennstoff)	MJ_{eq}/MJ					1.12				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Erdgas (Treibstoff)	MJ_{eq}/MJ					1.18				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Heizöl EL	MJ_{eq}/MJ					1.24				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Biogas	MJ_{eq}/MJ					0				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Klärschlamm (Klärschlammverbrennung)	MJ_{eq}/MJ					0				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Alternativbrennstoffe	MJ_{eq}/MJ					1.24				analog Heizöl EL
Wärmeeinkauf (FW Durchschnitt KVA-Netze)	MJ_{eq}/MJ					0.81				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Solarwärmeproduktion (Flachkollektor WW MFH)	MJ_{eq}/MJ					1.24				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Strommix CH 2010	MJ_{eq}/MJ					2.65				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Strommix CH 2050	MJ_{eq}/MJ					1.64				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Strom Kohlekraftwerk	MJ_{eq}/MJ					4.02				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Treibhausgasfaktoren: CO_2-Äquivalente zur Bereitstellung der Energie am Gebäudeeintritt										
Fernwärme (Abwasserwärme)	kg_{CO2eq}/MJ					0				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Erdgas (Brenn- und Treibstoff)	kg_{CO2eq}/MJ					0.066				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Heizöl EL	kg_{CO2eq}/MJ					0.083				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Biogas	kg_{CO2eq}/MJ					0				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Klärschlamm (Klärschlammverbrennung)	kg_{CO2eq}/MJ					0				
Alternativbrennstoffe	kg_{CO2eq}/MJ					0.083				Mittelwert Altöl/Lösungsmittel
Wärmeeinkauf (FW Durchschnitt KVA-Netze)	kg_{CO2eq}/MJ					0.045				
Solarwärmeproduktion (Flachkollektor WW MFH)	kg_{CO2eq}/MJ					0.005				
Strommix CH 2010	kg_{CO2eq}/MJ					0.045				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Strommix CH 2050	kg_{CO2eq}/MJ					0.028				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Strom Kohlekraftwerk	kg_{CO2eq}/MJ					0.344				gemäss KBOB/eco-bau/ESU-Services
Energiebilanz ARA										
Energieeigenbedarf								-	-	
Wärme	MWh/a	1'160	1'160	1'663	1'663	15'724	15'724	328'880	338'375	
BHKW	MWh/a	1'100	-	1'288	-	7'278	-	164'034	25'657	
Kessel	MWh/a	60	-	-	-	1'795	-	120'740	76'548	
Biogasaufbereitung	MWh/a	-	155	-	302	-	649	-	17'391	
WRG ARA-Prozess	MWh/a	-	696	375	998	-	1'000	2'782	103'590	
Wärmepumpe	MWh/a	-	309	-	363	6'651	14'075	8'944	92'185	
Klärschlammverbrennung	MWh/a	-	-	-	-	-	-	24'302	21'793	
Wärmeeinkauf	MWh/a	-	-	-	-	-	-	7'963	1'095	
Solarwärmeproduktion	MWh/a	-	-	-	-	-	-	115	115	
Strom	MWh/a	2'419	2'620	4'617	5'567	9'508	12'401	296'953	339'049	
ARA (ohne BHKW/Rückkühlung. Kessel)	MWh/a	2'362	2'362	4'170	4'170	5'540	5'540	270'904	271'537	
BHKW - Eigenstrombedarf	MWh/a	31	-	61	-	110	-	3'510	980	
BHKW - Rückkühlung	MWh/a	25	-	18	-	-	-	inkl.	inkl.	
Erdgaskessel	MWh/a	2	-	-	-	54	-	3'622	2'296	
Biogasaufbereitung	MWh/a	-	155	-	302	-	649	3'306	20'697	
Schlammtrocknung	MWh/a	-	-	-	-	1'520	1'520	inkl.	inkl.	
Wärmepumpe	MWh/a	-	103	367	1'095	2'284	4'692	2'801	30'728	
Schlammverbrennung	MWh/a	-	-	-	-	-	-	12'809	12'809	
Energieinput										
Abwasserwärme kalt (100%)	MWh/a	21'300	21'300	40'000	40'000	33'000	33'000	2'994'000	2'994'000	
Klärschlamm (Klärschlammverbrennung)	MWh/a	-	-	-	-	-	-	6'272	3'136	
Klärgas	MWh/a	3'139	3'139	6'121	6'121	12'987	12'987	480'970	517'360	
Erdgas	MWh/a	63	-	-	-	-	-	43'063	28'616	
Heizöl	MWh/a	-	-	95	-	1'270	-	44'071	36'881	
Alternativbrennstoffe	MWh/a	-	-	-	-	-	-	42'597	42'597	
Wärmeeinkauf	MWh/a	-	-	-	-	-	-	7'963	1'095	
Solarwärmeproduktion	MWh/a	-	-	-	-	-	-	115	115	
Strom	MWh/a	2'419	2'620	4'617	5'567	5'832	12'401	251'391	332'505	
Energieoutput										
Abwasserwärme kalt (extern genutzt)	MWh/a	-	-	-	-	-	-	-	-	493'385
BHKW-Abwärme externe Nutzung	MWh/a	-	-	1'732	-	-	-	4'881	-	6'143
Wärme WP externe Nutzung	MWh/a	-	-	1'842	3'662	-	-	1'842	10'042	
Wärme Kessel externe Nutzung	MWh/a	-	-	88		-	-	922	2	
Wärme Schlammverbrennung externe Nutzung	MWh/a	-	-	-	-	-	-	38'026	35'517	
Biogas	MWh/a	-	3'077	-	6'000	-	12'883	65'589	410'633	
Klärgas (Verkauf)	MWh/a	-	-	-	-	-	-	8'483	-	
Strom	MWh/a	1'031	-	2'048	-	-	-	37'026	85	
Verluste	MWh/a	25'890	23'981	45'123	42'027	53'089	45'505	3'713'672	3'500'027	
Fackelverluste	MWh/a	37	37	73	73	-	-	15'155	15'701	
Wärmeeigenbedarf	MWh/a	1'160	1'160	1'663	1'663	15'724	15'724	327'038	328'333	
BHKW-Abwärme ungenutzt	MWh/a	743	-	549	-	-	-	2'418	199	
Kaminverluste (Kessel, BHKW, Schlammverbr.)	MWh/a	216	-	408	-	1'443	-	87'776	32'434	
Methanschlupf	MWh/a	16	25	30	48	65	104	2'059	3'478	
Stromverluste (Reibung, etc.)	MWh/a	2'419	1'666	3'875	3'172	7'224	6'060	291'370	187'339	
ungenutzte ARA-Abwasserwärme kalt	MWh/a	21'300	21'094	38'525	37'070	28'633	23'617	2'987'857	2'932'543	
Weitere Verluste (Kontrollrechnung)	MWh/a	-	-	-	-	-	-	-	-	

Randbedingungen energetisch	Einheit	ARA-Anlagentyp 1		ARA-Anlagentyp 2 mit externem Wärmeverbund		ARA-Anlagentyp 3 mit ARA-WP und Trocknung		Schweizer Potential		Bemerkungen
		ARA-BHKW	Biogas-einspeisung	ARA-BHKW	Biogas-einspeisung	ARA-BHKW	Biogas-einspeisung	Ist-Zustand heute	Biogas-einspeisung	
Energiebilanz Nutzer (dezentral)										
Energieeigenbedarf										
Wärme	MWh/a	2'923	2'923	9'362	9'362	12'239	12'239	435'660	435'660	
Strom	MWh/a	1'194	1'194	2'328	2'328	4'999	4'999	159'411	159'411	
Treibstoff	MWh/a	3'077	3'077	6'000	6'000	12'883	12'883	410'633	410'633	
Energieinput Biogas nur als Treibstoff										
Fernwärme warm	MWh/a	-	-	3'662	3'662	-	-	45'669	45'559	
Klärgas	MWh/a	-	-	-	-	-	-	8'483	-	
Erdgas (Brennstoff)	MWh/a	3'077	3'077	6'000	6'000	12'883	12'883	401'588	410'633	
Erdgas (Treibstoff)	MWh/a	3'077	-	6'000	-	12'883	-	345'044	-	
Strom	MWh/a	163	1'194	280	2'328	4'999	4'999	122'384	159'326	
Energieinput Biogas nur zum Heizen										
Fernwärme warm	MWh/a	-	-	3'662	3'662	-	-	45'671	45'561	
Klärgas	MWh/a	-	-	-	-	-	-	8'483	-	
Erdgas (Brennstoff)	MWh/a	3'077	-	6'000	-	12'883	-	335'999	-	
Erdgas (Treibstoff)	MWh/a	3'077	3'077	6'000	6'000	12'883	12'883	410'633	410'633	
Strom	MWh/a	163	1'194	280	2'328	4'999	4'999	122'384	159'326	
Energieinput Biogas nur dezentrale WKK										
Fernwärme warm	MWh/a	-	-	3'662	3'662	-	-	45'671	45'561	
Klärgas	MWh/a	-	-	-	-	-	-	8'483	-	
Erdgas (Brennstoff)	MWh/a	3'077	1'620	6'000	3'158	12'883	6'781	370'517	216'121	
Erdgas (Treibstoff)	MWh/a	3'077	3'077	6'000	6'000	12'883	12'883	410'633	410'633	
Strom	MWh/a	163	-	280	-	4'999	-	96'936	-	
Energieinput Biogas gemischte Nutzung										
Fernwärme warm	MWh/a	-	-	3'662	3'662	-	-	45'671	45'561	
Klärgas	MWh/a	-	-	-	-	-	-	8'483	-	
Erdgas (Brennstoff)	MWh/a	3'077	1'587	6'000	3'095	12'883	6'645	369'827	211'798	
Erdgas (Treibstoff)	MWh/a	3'077	2'462	6'000	4'800	12'883	10'306	397'515	328'507	
Strom	MWh/a	163	478	280	931	4'999	1'999	107'115	63'730	

Vergleich Energie und Treibhausgas	Einheit	ARA-BHKW	Biogas-einspeisung	ARA-BHKW	Biogas-einspeisung	ARA-BHKW	Biogas-einspeisung	Ist-Zustand heute	Biogas-einspeisung	Bemerkungen
Biogas nur als Treibstoff										
Endenergie unbewertet	MWh/a	33'238	31'330	63'112	60'016	83'854	76'270	4'739'458	4'526'265	
ARA - Abwasserwärme	MWh/a	21'300	21'300	40'000	40'000	33'000	33'000	2'994'000	2'994'000	
ARA - Klärschlamm (Klärschlammverbrennung)	MWh/a	0	0	0	0	0	0	6'272	3'136	
ARA - Klärgas	MWh/a	3'139	3'139	6'121	6'121	12'987	12'987	480'970	517'360	
ARA - Erdgas	MWh/a	63	0	0	0	0	0	43'063	28'616	
ARA - Heizöl	MWh/a	0	0	95	0	1'270	0	44'071	36'881	
ARA - Alternativbrennstoffe	MWh/a	0	0	0	0	0	0	42'597	42'597	
ARA - Wärmeeinkauf	MWh/a	0	0	0	0	0	0	7'963	1'095	
ARA - Solarwärmeproduktion	MWh/a	0	0	0	0	0	0	115	115	
ARA - Strom	MWh/a	2'419	2'620	4'617	5'567	5'832	12'401	251'391	332'505	
Nutzer - Erdgas (Brennstoff)	MWh/a	3'077	3'077	6'000	6'000	12'883	12'883	401'588	410'633	
Nutzer - Erdgas (Treibstoff)	MWh/a	3'077	0	6'000	0	12'883	0	345'044	0	
Nutzer - Strom	MWh/a	163	1'194	280	2'328	4'999	4'999	122'384	159'326	
Endenergie bewertet										
Strommix CH 2010	MWh_{eq}/a	14'003	13'571	26'917	27'679	59'959	60'621	2'011'518	1'897'251	
Strommix CH 2050	MWh_{eq}/a	11'389	9'709	21'959	19'686	48'993	43'004	1'633'071	1'399'274	
Strom Kohlekraftwerk	MWh_{eq}/a	17'528	18'777	33'602	38'458	74'745	84'375	2'521'799	2'568'703	
Nutzungsgrad bewertet										
Strommix CH 2010	%									
Strommix CH 2050	%									
Strom Kohlekraftwerk	%									
Treibhausgasemissionen										
Strommix CH 2010	t_{CO2eq}/a	1'921	1'390	3'723	2'784	8'363	6'051	278'735	213'787	
Strommix CH 2050	t_{CO2eq}/a	1'766	1'161	3'428	2'309	7'711	5'004	256'245	184'194	
Strom Kohlekraftwerk	t_{CO2eq}/a	4'703	5'499	8'998	11'290	20'032	24'797	681'432	743'675	
Treibhausgasemissionen pro bewerteten Primärenergiebedarf										
Strommix CH 2010	t_{CO2eq}/MWh	0.14	0.10	0.14	0.10	0.14	0.10	0.14	0.11	
Strommix CH 2050	t_{CO2eq}/MWh	0.16	0.12	0.16	0.12	0.16	0.12	0.16	0.13	
Strom Kohlekraftwerk	t_{CO2eq}/MWh	0.27	0.29	0.27	0.29	0.27	0.29	0.27	0.29	
Biogas nur zum Heizen										
Endenergie unbewertet	MWh/a	33'238	31'330	63'112	60'016	83'854	76'270	4'739'458	4'526'265	
ARA - Abwasserwärme	MWh/a	21'300	21'300	40'000	40'000	33'000	33'000	2'994'000	2'994'000	
ARA - Klärschlamm (Klärschlammverbrennung)	MWh/a	0	0	0	0	0	0	6'272	3'136	
ARA - Klärgas	MWh/a	3'139	3'139	6'121	6'121	12'987	12'987	480'970	517'360	
ARA - Erdgas	MWh/a	63	0	0	0	0	0	43'063	28'616	
ARA - Heizöl	MWh/a	0	0	95	0	1'270	0	44'071	36'881	
ARA - Alternativbrennstoffe	MWh/a	0	0	0	0	0	0	42'597	42'597	
ARA - Wärmeeinkauf	MWh/a	0	0	0	0	0	0	7'963	1'095	
ARA - Solarwärmeproduktion	MWh/a	0	0	0	0	0	0	115	115	
ARA - Strom	MWh/a	2'419	2'620	4'617	5'567	5'832	12'401	251'391	332'505	
Nutzer - Erdgas (Brennstoff)	MWh/a	3'077	0	6'000	0	12'883	0	335'999	0	
Nutzer - Erdgas (Treibstoff)	MWh/a	3'077	3'077	6'000	6'000	12'883	12'883	410'633	410'633	
Nutzer - Strom	MWh/a	163	1'194	280	2'328	4'999	4'999	122'384	159'326	
Endenergie bewertet										
Strommix CH 2010	MWh_{eq}/a	14'003	13'755	26'917	28'039	59'959	61'394	2'015'453	1'921'889	
Strommix CH 2050	MWh_{eq}/a	11'389	9'894	21'959	20'046	48'993	43'777	1'637'007	1'423'912	
Strom Kohlekraftwerk	MWh_{eq}/a	17'528	18'961	33'602	38'818	74'745	85'148	2'525'735	2'593'341	
Nutzungsgrad bewertet										
Strommix CH 2010	%									
Strommix CH 2050	%									
Strom Kohlekraftwerk	%									
Treibhausgasemissionen										
Strommix CH 2010	t_{CO2eq}/a	1'921	1'390	3'723	2'784	8'363	6'051	278'735	213'787	
Strommix CH 2050	t_{CO2eq}/a	1'766	1'161	3'428	2'309	7'711	5'004	256'245	184'194	
Strom Kohlekraftwerk	t_{CO2eq}/a	4'703	5'499	8'998	11'290	20'032	24'797	681'432	743'675	
Treibhausgasemissionen pro bewerteten Primärenergiebedarf										
Strommix CH 2010	t_{CO2eq}/MWh	0.14	0.10	0.14	0.10	0.14	0.10	0.14	0.11	
Strommix CH 2050	t_{CO2eq}/MWh	0.16	0.12	0.16	0.12	0.16	0.11	0.16	0.13	
Strom Kohlekraftwerk	t_{CO2eq}/MWh	0.27	0.29	0.27	0.29	0.27	0.29	0.27	0.29	

Vergleich Energie und Treibhausgas	Einheit	ARA-Anlagentyp 1		ARA-Anlagentyp 2 mit externem Wärmeverbund		ARA-Anlagentyp 3 mit ARA-WP und Trocknung		Schweizer Potential		Bemerkungen
		ARA-BHKW	Biogas-einspeisung	ARA-BHKW	Biogas-einspeisung	ARA-BHKW	Biogas-einspeisung	Ist-Zustand heute	Biogas-einspeisung	
Biogas nur dezentrale WKK										
Endenergie unbewertet	MWh/a	33'238	31'755	63'112	60'846	83'854	78'051	4'748'528	4'583'060	
ARA - Abwasserwärme	MWh/a	21'300	21'300	40'000	40'000	33'000	33'000	2'994'000	2'994'000	
ARA - Klärschlamm (Klärschlammverbrennung)	MWh/a	0	0	0	0	0	0	6'272	3'136	
ARA - Klärgas	MWh/a	3'139	3'139	6'121	6'121	12'987	12'987	480'970	517'360	
ARA - Erdgas	MWh/a	63	0	0	0	0	0	43'063	28'616	
ARA - Heizöl	MWh/a	0	0	95	0	1'270	0	44'071	36'881	
ARA - Alternativbrennstoffe	MWh/a	0	0	0	0	0	0	42'597	42'597	
ARA - Wärmeeinkauf	MWh/a	0	0	0	0	0	0	7'963	1'095	
ARA - Solarwärmeproduktion	MWh/a	0	0	0	0	0	0	115	115	
ARA - Strom	MWh/a	2'419	2'620	4'617	5'567	5'832	12'401	251'391	332'505	
Nutzer - Erdgas (Brennstoff)	MWh/a	3'077	1'620	6'000	3'158	12'883	6'781	370'517	216'121	
Nutzer - Erdgas (Treibstoff)	MWh/a	3'077	3'077	6'000	6'000	12'883	12'883	410'633	410'633	
Nutzer - Strom	MWh/a	163	0	280	0	4'999	0	96'936	0	
Endenergie bewertet										
Strommix CH 2010	MWh_{eq}/a	14'003	12'399	26'917	25'396	59'959	55'718	1'986'553	1'740'968	
Strommix CH 2050	MWh_{eq}/a	11'389	9'747	21'959	19'759	48'993	43'162	1'633'873	1'404'307	
Strom Kohlekraftwerk	MWh_{eq}/a	17'528	15'976	33'602	32'997	74'745	72'647	2'462'092	2'194'907	
Nutzungsgrad bewertet										
Strommix CH 2010	%									
Strommix CH 2050	%									
Strom Kohlekraftwerk	%									
Treibhausgasemissionen										
Strommix CH 2010	t_{CO2eq}/a	1'921	1'583	3'723	3'160	8'363	6'857	282'839	239'482	
Strommix CH 2050	t_{CO2eq}/a	1'766	1'425	3'428	2'825	7'711	6'111	261'880	219'475	
Strom Kohlekraftwerk	t_{CO2eq}/a	4'703	4'405	8'998	9'158	20'032	20'217	658'118	597'716	
Treibhausgasemissionen pro bewerteten Primärenergiebedarf										
Strommix CH 2010	t_{CO2eq}/MWh	0.14	0.13	0.14	0.12	0.14	0.12	0.14	0.14	
Strommix CH 2050	t_{CO2eq}/MWh	0.16	0.15	0.16	0.14	0.16	0.14	0.16	0.16	
Strom Kohlekraftwerk	t_{CO2eq}/MWh	0.27	0.28	0.27	0.28	0.27	0.28	0.27	0.27	
Biogas gemischte Nutzung										
Endenergie unbewertet	MWh/a	33'238	31'585	63'112	60'514	83'854	77'339	4'744'899	4'560'341	
ARA - Abwasserwärme	MWh/a	21'300	21'300	40'000	40'000	33'000	33'000	2'994'000	2'994'000	
ARA - Klärschlamm (Klärschlammverbrennung)	MWh/a	0	0	0	0	0	0	6'272	3'136	
ARA - Klärgas	MWh/a	3'139	3'139	6'121	6'121	12'987	12'987	480'970	517'360	
ARA - Erdgas	MWh/a	63	0	0	0	0	0	43'063	28'616	
ARA - Heizöl	MWh/a	0	0	95	0	1'270	0	44'071	36'881	
ARA - Alternativbrennstoffe	MWh/a	0	0	0	0	0	0	42'597	42'597	
ARA - Wärmeeinkauf	MWh/a	0	0	0	0	0	0	7'963	1'095	
ARA - Solarwärmeproduktion	MWh/a	0	0	0	0	0	0	115	115	
ARA - Strom	MWh/a	2'419	2'620	4'617	5'567	5'832	12'401	251'391	332'505	
Nutzer - Erdgas (Brennstoff)	MWh/a	3'077	1'587	6'000	3'095	12'883	6'645	369'827	211'798	
Nutzer - Erdgas (Treibstoff)	MWh/a	3'077	2'462	6'000	4'800	12'883	10'306	397'515	328'507	
Nutzer - Strom	MWh/a	163	478	280	931	4'999	1'999	107'115	63'730	
Endenergie bewertet										
Strommix CH 2010	MWh_{eq}/a	14'003	12'905	26'917	26'381	59'959	57'834	1'997'325	1'808'408	
Anteil ARA	MWh_{eq}/a	6'493	6'954	12'375	14'780	17'058	32'921	829'682	1'014'366	
Anteil Nutzer	MWh_{eq}/a	7'510	5'950	14'542	11'602	42'901	24'912	1'167'643	794'042	
Strommix CH 2050	MWh_{eq}/a	11'389	9'769	21'959	19'802	48'993	43'253	1'634'339	1'407'221	
Anteil ARA	MWh_{eq}/a	4'043	4'302	7'700	9'143	11'153	20'366	575'150	677'705	
Anteil Nutzer	MWh_{eq}/a	7'345	5'467	14'259	10'659	37'840	22'888	1'059'189	729'516	
Strom Kohlekraftwerk	MWh_{eq}/a	17'528	17'133	33'602	35'253	74'745	77'493	2'486'761	2'349'352	
Nutzungsgrad bewertet										
Strommix CH 2010	%									
Strommix CH 2050	%									
Strom Kohlekraftwerk	%									
Treibhausgasemissionen										
Strommix CH 2010	t_{CO2eq}/a	1'921	1'506	3'723	3'010	8'363	6'535	281'197	229'204	
Anteil ARA	t_{CO2eq}/a	433	467	827	984	1'436	2'185	81'628	90'566	
Anteil Nutzer	t_{CO2eq}/a	1'489	1'039	2'896	2'026	6'927	4'350	199'569	138'638	
Strommix CH 2050	t_{CO2eq}/a	1'766	1'319	3'428	2'619	7'711	5'668	259'626	205'362	
Anteil ARA	t_{CO2eq}/a	287	309	549	649	1'085	1'439	66'502	70'559	
Anteil Nutzer	t_{CO2eq}/a	1'479	1'010	2'879	1'970	6'626	4'229	193'123	134'804	
Strom Kohlekraftwerk	t_{CO2eq}/a	4'703	4'842	8'998	10'011	20'032	22'049	667'444	656'099	
Treibhausgasemissionen pro bewerteten Primärenergiebedarf										
Strommix CH 2010	t_{CO2eq}/MWh	0.14	0.12	0.14	0.11	0.14	0.11	0.14	0.13	
Strommix CH 2050	t_{CO2eq}/MWh	0.16	0.14	0.16	0.13	0.16	0.13	0.16	0.15	
Strom Kohlekraftwerk	t_{CO2eq}/MWh	0.27	0.28	0.27	0.28	0.27	0.28	0.27	0.28	