



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

Bundesamt für Umwelt BAFU



WWF Schweiz

Transformation der Abfallverwertung in der Schweiz für eine hohe und zeitlich optimierte Energieausnutzung

Schlussbericht

Eine Zusammenarbeit von

econcept

Forschung / Beratung / Evaluation

Pytec

Abfalltechnologie + Energiekonzepte

30. Juni 2014

Gerechtigkeitsgasse 20 8002

Zürich

Tel. 044 286 75 75

Fax 044 286 75 76

Alte Bahnhofstrasse 5

Postfach 1139

3110 Münsingen

Tel. 031 724 33 33

Fax 031 724 33 35

Begleitgruppe:

Wir danken der Begleitgruppe für Ihre Unterstützung und wertvolle Mitarbeit.

Dr. Patrick Hofstetter, WWF Schweiz (Leitung)

Daniel Binggeli, Bundesamt für Energie BFE

Beat Calonder: cercle déchets, Vereinigung der kantonalen Fachleute für Abfall und Ressourcen

Dr. Bernhard Dettwiler, Fernwärme Zürich AG, Vertretung Fernwärmeverband

Prof. Dr. Stefanie Hellweg / Carl Vadenbo, ETH Zürich, Professur für ökologisches Systemdesign

Michael Hügi, Bundesamt für Umwelt BAFU

Rafael Osswald, Alpiq Suisse AG

Dr. Georg Person, Zweckverband Abfallbehandlung Kahlenberg (ZAK), Ringsheim

Dr. Robin Quartier, Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA)

Für den Inhalt dieser Studie ist die Autorenschaft verantwortlich.

Erarbeitet durch

econcept AG, Gerechtigkeitsgasse 20, CH-8002 Zürich

www.econcept.ch / + 41 44 286 75 75

Rytec AG, Alte Bahnhofstrasse 5, Postfach 1139, CH-3110 Münsingen

www.rytec.ch / + 41 31 724 33 33

Autoren/innen

Reto Dettli, Dipl. Ing. ETH, NDS ETHZ in Betriebswissenschaften (econcept AG)

Raphael Fasko, BSc ETH, Umweltnaturwissenschaften (Rytec AG)

Urban Frei, Dipl. Umwelt-Natw. ETHZ (Rytec AG)

Fabienne Habermacher, MSc ETH, Umweltnaturwissenschaften (econcept AG)

Inhalt

Zusammenfassung	iii
1 Fragestellung und Ziel der Studie	1
1.1 Ausgangslage und Fragestellung	1
1.2 Ziele und Vorgehen	1
2 Abfälle und Energie: Heutige Situation und erwartete Entwicklung	3
2.1 Abfallwirtschaft heute	3
2.2 Energiewirtschaft heute und 2035	11
2.3 Abfallwirtschaft 2035 – Szenario «Weiter wie bisher»	23
2.4 Folgerungen und Bemerkungen zum Szenario «Weiter wie bisher»	28
3 Zukünftige Rahmenbedingungen und strategische Optionen für die Transformation der Abfallwirtschaft	30
3.1 Zukünftige Rahmenbedingungen	30
3.2 Strategische Optionen	36
4 Handlungsoptionen für die Transformation der Abfallwirtschaft	39
4.1 Beschrieb der Handlungsoptionen	39
4.2 Wechselwirkungen der Handlungsoptionen	45
5 Grundsätze der Optimierung	47
5.1 Stellenwert von Recycling und energetischer Nutzung	47
5.2 Hierarchie der Nutzung für die Lenkung von Stoffströmen	47
5.3 Optimierte Zuordnung auf die besten Entsorgungs-/Nutzungswege	52
6 Stofflich und energetisch optimierte Abfallwirtschaft	54
6.1 Gesamtbild: ökologische Abfallbehandlung auf Energie getrimmt	54
6.2 Massnahmenbündel zur Erreichung der optimierten Abfallwirtschaft	62
6.3 Auswirkungen	66
7 Herausforderungen der Umsetzung und Empfehlungen	79
7.1 Anpassungsbedarf Infrastrukturen und Logistik	79
7.2 Herausforderungen der Umsetzung	79
7.3 Empfehlungen	81
Literaturverzeichnis	85

Anhang	88	
A-1	Abkürzungsverzeichnis	88
A-2	Entwicklung Siedlungsabfälle und BIP	89
A-3	Entwicklung der Schweizer Separatsammlungsquoten	90
A-4	Massenflüsse und Verwertungswege von Abfällen in der Schweiz	91
A-5	Energieflüsse von Abfällen in der Schweiz	94
A-6	Angelieferte Abfallmengen im Jahresverlauf	97
A-7	Tagesverlauf der Wärmenachfrage	98
A-8	Wärmeverbrauch pro Betrieb nach Industriebranchen	99
A-9	Jährliche CO ₂ -Emissionen von Industriebetrieben	100
A-10	Einflussmatrix der Handlungsoptionen	101
A-11	Exergieberechnung detaillierte Daten	102
A-12	Saisonaler Betrieb einer KVA und Lagerbedarf	103
A-13	Schätzung Investitionskosten «optimierte Abfallwirtschaft» im Vergleich zu «Weiter wie bisher»	104
A-14	Energieströme und Energieproduktion für 2012 und die Szenarien «Weiter wie bisher» und «Optimal»	106

Zusammenfassung

Die Energieversorgung der Schweiz ist im Wandel. Mit der Energiestrategie 2050 zeigt der Bund mögliche Szenarien der Energieversorgung auf. Alle weisen eine weiterhin ungenügende Deckung der Stromnachfrage im Winter durch die inländische Produktion aus. Ebenfalls wird die Schweiz zwar sinkende, aber weiterhin hohe Importe an fossilen Brennstoffen aufweisen. Der vorliegende Bericht geht den Fragen nach, wie sich die heutige Situation der Abfallverwertung und Energienutzung und die erwartete Entwicklung präsentieren, welche technischen Optimierungen der Energienutzung bestehen und wie die Abfallwirtschaft transformiert werden kann, damit sie einen mengenmässig relevanten und zeitlich optimierten Beitrag an die Schweizer Energieversorgung leisten kann.

Die Energieabgabe der Abfallwirtschaft trägt heute rund 7% zur Wärmeversorgung und rund 2.5% zur Elektrizitätsversorgung der Schweiz bei. Es ist jedoch zu beachten, dass der regionale Anteil an die Energieversorgung sehr bedeutend werden kann. Bedeutende regionale Wärmenetze werden aus Abfallenergie gespeisen und der KVA-Strom kann ein gewichtiger Anteil im Portfolio eines Elektrizitätsversorgungsunternehmens darstellen. Für eine hohe und zeitlich optimierte Energieausnutzung des Abfalls gilt es, den Abfall bedarfsgerecht in den jeweils effizientesten Anlagen zu verwerten. Teilweise bedingt dies Anlagenerneuerungen oder Neubauten. Die der Optimierung zugrunde gelegte Technologieentwicklung beinhaltet keine der um die Jahrtausendwende gescheiterten Alternativen wie Pyrolyse, Schwelbrennverfahren oder Thermoselect.

Der ausgearbeitete Vorschlag für eine optimierte Zusammensetzung des Anlagenparks empfiehlt folgende Nutzungsprioritäten (stofflich → exergetisch → Substitutionseffekt):

- 1 Stoffliche Verwertung – sofern das Recycling ökobilanziell mindestens gleich gut abschneidet wie eine optimale energetische Nutzung
- 2 Direkte Verbrennung geeigneter Abfallfraktionen in der Industrie (Zementwerk)
- 3 Industrielle Heizkraftwerke und Sonderverbrennungen (Industriefeuerungen für Lösungsmittel, Altholz; Monoverbrennungen für Klärschlämme, Sonderabfallverbrennungsanlagen etc.)
- 4 KVA im Industrieverbund (Typ 1)
- 5 Fernwärme-KVA in Bandlast (Typ 2)
- 6 Fernwärme-KVA mit saisonaler Betriebsweise (Typ 3a)
- 7 Strom-KVA, deren Standorte für eine optimale Stromproduktion geeignet sind (Typ 4)

Die Anlagen der Nutzungsprioritäten 3 bis 6 sind auch für die (Teil-)Verstromung des Dampfes bis auf das erforderliche Wärmenutzungs niveau ausgerüstet.

Welche Abfallströme lenkt die «optimierte Abfallwirtschaft» im Jahr 2035 in welche Nutzungen? Die nachfolgenden Ergebnisse basieren auf einer Prognose des Abfallangebotes (Abfallaufkommen, Abfallarten) und der Energienachfrage (Strom, Prozesswärme, Gebäudewärme, Anergienutzungen) gemäss den Schweizerischen Energieperspektiven und den Prognosen zur wirtschaftlichen Entwicklung. In der Vergangenheit haben sich

die Abfallmengen als verlässlicher Konjunkturindikator erwiesen. Da trotz der angelaufenen politischen Diskussion noch keine Entkoppelung des Abfallaufkommens von BIP und Materialverbrauch absehbar ist, wird bis 2035 proportional zu den Konjunkturprognosen (SECO 2011) die Abfallmenge gegenüber 2012 um 25% bei +0.9% BIP-Wachstum pro Jahr steigen. Würde auf die Prognose des BAK-Basel abgestellt, ergibt sich bei 1.7% jährlichem Wirtschaftswachstum eine gegenüber heute um 50% höhere Abfallmenge. Gemäss Energieperspektiven 2050 wird die Energienachfrage im Wärmebereich bis 2035 um ca. 25% sinken. Die Stromnachfrage sollte 2035 wieder auf das Niveau von 2013 zurückgefallen sein und weiter abnehmen. Der Nachfrageüberhang im Winter und die Stromüberschüsse im Sommer werden weiterhin den Strommarkt in der Schweiz prägen. Mit ihren hohen Fixkosten im Anlagenpark kann die Abfallwirtschaft den saisonalen Elektrizitätsbedarf nur in geringem Mass entlasten. Allfällige Leerstandskosten wären höher als die ebenfalls beachtlichen Kosten für die Ausscheidung und die saisonale Lagerung geeigneter Abfallfraktionen.

Auf der Grundlage der Mengen- und Energieströme 2012 und der wahrscheinlichsten Entwicklung wurde ein «Weiter wie bisher» Szenario beschrieben. Diesem kann das Modell der «optimierten Abfallwirtschaft» gegenübergestellt werden:

Kenngrössen	Einheit	Ist-Zustand 2012	Szenario «Weiter wie bisher»	Szenario «optimierte Abfallwirtschaft»
Abfälle				
Gesamtabfallmengen CH (inkl. Importe)*	Mio. t/a	20.3	26.2	26.2
davon energetisch genutzt**	Mio. t/a	5.1	6.2	6.9
Verwertungsanlagen und Energieabgabe				
Anzahl Verwertungsanlagen (ohne Biogasanlagen)	Anzahl	62	71	59
davon Zementwerke	Anzahl	6	6	6
davon industrielle Feuerungen	Anzahl	26	34	34
davon KVA	Anzahl	30	31	19
Energieabgabe Verwertungsanlagen CH	GWh/a	7'800	10'700	12'900
davon Wärme	GWh/a	6'100	8'400	9'200
davon Strom	GWh/a	1'600	2'200	3'500
davon Biogas (ohne ARA, LW-Anlagen)	GWh/a	60	150	150
Energieinhalt exportierte Abfälle	GWh/a	2'600	3'200	200
Auswirkungen Finanzen und Umwelt				
Mehrinvestitionen geg. «Weiter wie bisher»	Mio. CHF			1'900
Jährliche Mehrkosten geg. «Weiter wie bisher», (nicht durch Marktpreise der Energie gedeckt)	Mio. CHF/a			20
Emissionsverminderung CO ₂ geg. «Weiter wie bisher»***	t CO ₂ -Äq.			
mit CH-Produktionsmix				315'000
mit Produktion in GuD				902'000

Tabelle 1: Ist-Zustand 2012 und Szenarien «Weiter wie bisher» sowie «optimierte Abfallwirtschaft» im Jahr 2035 im Überblick

*inkl. Bauabfälle, inkl. Recycling und Deponien

**thermische Verwertung und Vergärung in der Schweiz (ohne Exporte)

***Annahme: Energie aus der Abfallverwertung wird als CO₂-neutral betrachtet

Die Energieabgabe der Abfallanlagen kann in der «optimierten Abfallwirtschaft» von heute rund 6'100 GWh Wärme und 1'600 GWh Strom bis im Jahr 2035 auf 9'200 GWh Wärme und 3'500 GWh Strom deutlich gesteigert werden. Insbesondere die Stromnutzung lässt sich gegenüber dem Szenario «Weiter wie bisher» um gut 50% erhöhen, sofern Exporte von energiereichen Abfällen (Altholz, Kunststoffe) unterbunden werden. Unter diesen Annahmen könnte die Energieabgabe der Abfallwirtschaft im Jahr 2035 rund 14% der prognostizierten Wärmenachfrage bzw. 6% der Elektrizitätsnachfrage (gemäss NEP-Szenario, Prognos 2012a) decken. Die Winterstromerzeugung der Abfallverwertungsanlagen, welche heute rund 800 GWh beträgt, wird sich bis im Jahr 2035 unter dem Szenario «Weiter wie bisher» auf schätzungsweise 1'100 GWh erhöhen. Dank der «optimierten Abfallwirtschaft» kann sie auf rund 1'800 GWh gesteigert werden. Unter diesen Vorgaben ist absehbar, dass die Versorgung der Fernwärmenetze und ein grosser Teil der industriell benötigten Prozesswärme aus Abfällen sichergestellt werden kann, auch wenn zuvor der Brennstoffbedarf der Zementwerke mit signifikanten Mehrmengen gedeckt wird.

Die «optimierte Abfallwirtschaft» kann einen beträchtlichen Beitrag zur Emissionsverminderung leisten. Im Vergleich zu «Weiter wie bisher» können schätzungsweise 315'000 Tonnen CO₂ eingespart werden, wenn die Elektrizitätsproduktion mit dem Schweizer Strommix verglichen wird. Wird stattdessen davon ausgegangen, dass die zusätzliche Stromproduktion der Abfallwirtschaft ausschliesslich Strom von Gaskombikraftwerken (GuD) substituiert, betragen die gesamten CO₂-Einsparungen der «optimierten Abfallwirtschaft» rund 902'000 Tonnen. Dies sind knapp 1% (CH-Mix) bzw. 2.5% (GuD) der gesamten heutigen CO₂-Emissionen der Schweiz. Es ist zu beachten, dass es sich dabei um eine rein nationale Betrachtung handelt, da der Effekt der Massnahme zur Exportbegrenzung nur in der Schweiz bilanziert wird. Die ausgewiesenen Treibhausgaseinsparungen weisen also nur die Wirkung der Transformation der Abfallwirtschaft in der Schweiz aus.

Für eine «optimierte Abfallwirtschaft» fallen im betrachteten Zeithorizont im Vergleich zum Szenario «Weiter wie bisher» zusätzliche Investitionskosten von rund 1'900 Mio. CHF an. Unter den angenommenen Amortisationsfristen, Zinsniveaus und am Markt erzielbaren Energieerträgen würden jährlich rund 20 Mio. CHF ungedeckte Nettokosten verbleiben. Je nach CO₂-Reduktionsszenario (Strom aus CH-Mix/GuD) ergäbe dies Vermeidungskosten von 22 bis 63 CHF pro Tonne CO₂. Die meisten Schätzungen der externen Kosten von Treibhausgasemissionen übersteigen diese Spannbreite. Somit wäre die optimierte Abfallwirtschaft betriebswirtschaftlich unter den getroffenen Annahmen knapp unwirtschaftlich, aber volkswirtschaftlich lohnend.

Auf dem Weg hin zu diesem, aus heutiger Sicht optimierten, Zustand müssen einige Herausforderungen angegangen werden:

- Politischer Wille, um zeitlich passend eine übergreifende Abfallplanung mit einer kohärenten Standortplanung zu installieren.
- Neue Rollenverteilung unter den Akteuren der Abfallwirtschaft, die als Energiedienstleister auftreten müssen. Im Bereich der industriellen Heizkraftwerke sind möglicher-

weise neue Formen der Trägerschaft und Sortierwerke für die Brennstoffaufbereitung nötig.

- Marktverzerrungen, wenn ineffiziente Altanlagen diejenigen Abfälle günstig verbrennen, die eigentlich andernorts für die Substitution fossiler Energien in (teuer) energetisch optimierten Anlagen genutzt werden sollten. Es fehlen wirtschaftliche Anreize für Energieeffizienzverbesserungen und Anpassungen bei der Logistik.
- Beträchtliche finanzielle Risiken beim Aufbau von Wärmeversorgungsleitungen und Effizienzsteigerungen bei den Anlagen.
- Viele Anlagen verfügen dank der gesetzlich geforderten Rückstellungen inzwischen über grosse Finanzmittel, die den Anlagenersatz sicherstellen sollen. Der dadurch entstehende Anreiz zur Erneuerung von Anlagen an ungünstigen Standorten kann die Transformation hemmen.
- Bestehende Fernwärmenetze an Standorten von KVA, welche gemäss der vorgeschlagenen Transformation der Abfallwirtschaft als nicht optimal bezeichnet werden, müssen auch zukünftig mit einem ökologisch sinnvollen Energieträger versorgt werden.

Als Resultat der Studie kann festgehalten werden, dass der Beitrag der Abfallwirtschaft an die Energieversorgung, insbesondere in der Wärmebereitstellung, noch stark gesteigert werden kann, wenn darauf geachtet wird, dass der Abfall dort verbrannt wird, wo die Wärme auch sofort genutzt werden kann. Die reine Stromproduktion ist nur «ultima ratio», für die Tonnagen, deren Energieinhalt nicht als Wärme genutzt werden kann.

Die Autoren/innen empfehlen folgende Massnahmen:

- Nationale Koordination
Für die nationale Standortplanung und die Koordination des Transformationsprozesses der Schweizer Abfallwirtschaft muss ein zuständiges Gremium geschaffen werden. Dazu sind die gesetzlichen Grundlagen zu schaffen und die Entscheidungsbefugnisse zu bezeichnen. Dabei sind auch neue Akteure in die Planung einzubeziehen, wie beispielsweise Betreiber/innen von Zementwerken, industriellen Feuerungen, Abfalllagern, Ersatzbrennstoff-Aufbereitungsanlagen, Tieftemperatur-Nutzungen (Fischzüchter, Gewächshausbetreiber, Anergienetze...).
- Für die KVA sollen Zielvorgaben für die geforderte Energieeffizienz definiert werden, welche mit einem finanziellen Bonus-Malus-System bewertet werden. Der finanzielle Bonus-Malus ist so auszugestalten, dass sich auch Verbesserungen bei der Logistik finanziell lohnen.
- Die Einführung derartiger oder ähnlicher marktwirtschaftlicher Lenkungsmaßnahmen soll sicherstellen, dass energieeffiziente Anlagen gegenüber nicht energieeffizienten Anlagen über einen Wettbewerbsvorteil verfügen.

- Für den Export von Abfällen soll eine Nachweispflicht eingeführt werden, dass die Verwertung im Ausland energetisch und ökologisch mindestens gleichwertig wie in der Schweiz erfolgt. Andernfalls müssen diese Abfallmengen in inländischen Anlagen genutzt werden.
- Logistik und Anlagen
Die Standorte von Entsorgungsanlagen (Neuanlagen) sind bewusst aufgrund der Energienutzungsmöglichkeiten zu wählen oder letztere sind entsprechend zu entwickeln, beispielsweise durch die Ausscheidung von Industriezonen, aktives Standortmarketing oder attraktive finanzielle Konditionen bei Landverkäufen oder Abgaben im Baurecht. Dies bedingt auch Anpassungen bei der Entsorgungslogistik, beispielsweise Umladestationen und Sortierwerke, da günstige Standorte für effiziente Anlagen (z.B. Flusskühlung) räumlich beschränkt sind.
- Sicherung der Finanzierung und Schaffen von Trägerschaften
Damit die Finanzierung des Ausbaus der Fernwärme sichergestellt werden kann, sollen durch den Bund Risikogarantien bei Fernwärmeprojekten, insbesondere bei industriellen Kunden, geleistet werden. Zudem ist zu prüfen, wie vor allem für die neu zu schaffenden privaten Trägerschaften im Bereich industrieller Heizkraftwerke eine langfristig verbindlich gesicherte Abfalllieferung sichergestellt werden kann.
- Kostenwälzungsmodell für Energieeffizienzinvestitionen und Energienutzung
Gemäss Umweltschutzgesetz gilt bei der Entsorgung von Abfällen das Verursacherprinzip. Diese Bestimmungen sind dahingehend zu präzisieren, dass die Mehrkosten einer optimalen Energienutzung den Verursachern der Abfälle übertragen und in die Abfallgebühren integriert werden können, wenn die Energiemärkte diese Investitionen nicht erlauben würden.

Für eine durchgängige und konsequente Gestaltung des Anlagenparks der Abfallwirtschaft ist als erster Schritt ein übergeordnetes Koordinationsorgan zu schaffen, das in Grossregionen denkt und entsprechende Schwerpunkte setzt. Es ist zu vermeiden, dass sich Anlagen der öffentlichen Hand aus betriebswirtschaftlichen Gründen darin behindern, den volkswirtschaftlich grössten Nutzen zu leisten: eine sichere und umweltverträgliche Entsorgung bei gleichzeitig maximaler Energienutzung mit einem optimalen Substitutionseffekt von fossilen Energieträgern. Die Transformation der Abfallwirtschaft wird auch über den betrachteten Zeitraum von 2035 eine Herausforderung bleiben, da sich der zukünftige Wärmebedarf und die Abfallzusammensetzung weiter verändern werden.

1 Fragestellung und Ziel der Studie

1.1 Ausgangslage und Fragestellung

Die Bundesämter für Energie und für Umwelt sowie der WWF haben die Arbeitsgemeinschaft econcept AG und Ryttec AG beauftragt, eine Studie zur Optimierung der Schweizerischen Abfallwirtschaft unter einem energetischen Blickwinkel, aber mit Berücksichtigung der stofflichen Gegebenheiten durchzuführen.

Die Schweizerische Abfallverwertung ist gekennzeichnet durch eine hohe Professionalität und erfüllt die Zielsetzungen der Umweltgesetzgebung. Im Bereich der Energienutzung besteht jedoch Optimierungspotenzial. Einerseits durch Technologien oder Systeme mit einem höheren energetischen Nutzungsgrad und andererseits durch organisatorische Massnahmen für eine verbesserte zeitliche und örtliche Abstimmung von Energieproduktion und Energienutzung. Diese Optimierung kann einen bedeutenden Beitrag zur Energiestrategie 2050 des Bundes leisten.

Es gilt folgende zentrale Fragestellungen zu klären:

- Wie präsentiert sich die heutige Situation der Abfallverwertung und Energienutzung und wie ist die erwartete Entwicklung?
- Welche technischen Möglichkeiten bestehen für eine verbesserte Energienutzung?
- Wie präsentiert sich eine stofflich und energetisch optimierte Abfallwirtschaft im Jahr 2035?
- Wie müsste die Abfallwirtschaft transformiert werden?
- Welche wirtschaftlichen Auswirkungen hätte diese Transformation und wie könnten diese abgedeckt werden?
- Welche Hemmnisse bestehen auf diesem Weg und welche konkreten Umsetzungsschritte sind nötig?

1.2 Ziele und Vorgehen

Zieldefinition

Die übergeordnete Zielsetzung der Transformation der Schweizer Abfallverwertung ist es, die Energieausnutzung zu erhöhen und zeitlich zu optimieren. Für die Erarbeitung dieser Studie wurden die folgenden drei Hauptziele definiert, welche eine «stofflich und energetisch optimierte Abfallwirtschaft» erfüllen soll:

1. Die Abfallverwertung leistet im Vergleich zu heute einen grösseren und bedarfsorientierteren Beitrag zur Erfüllung der energetischen Zielvorgaben der Energiestrategie 2050 des Bundesrats.

2. Die Transformation der Abfallverwertung hat keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt zur Folge und steht einer gesamtökologisch optimierten stofflichen Verwertung nicht im Weg.
3. Die volkswirtschaftlichen Kosten des Transformationspfades sind vertretbar.

Die Definition der Zielsetzungen für ein «optimiertes Szenario» beinhaltet noch keine Festlegung hinsichtlich welcher Faktoren (Wärme, Elektrizität, Leistung...) die Energieausnutzung optimiert werden soll.

Vorgehen

Die Abfallwirtschaft wird anhand von drei Szenarien betrachtet. Als erstes werden die heutige Abfall- und Energiewirtschaft in der Ausgangssituation 2012 dargelegt. Danach werden die erwarteten Entwicklungen bis im Jahr 2035 beschrieben, welche das Abfall- und Energiesystem massgeblich beeinflussen, ohne dass ein Eingriff im Sinne der «Transformation der Abfallwirtschaft» vollzogen wird. Diese «ungesteuerte» Entwicklung der Abfallwirtschaft wird im Szenario «Weiter wie bisher» dargelegt. Im Gegensatz dazu wird das Szenario der «optimierten Abfallwirtschaft» für das Jahr 2035 entwickelt. Dieses basiert auf einer Analyse von möglichen Handlungsoptionen und Optimierungsgrundsätzen, welche die erwünschte Transformation ermöglichen. Das System der optimierten Abfallwirtschaft wird aus energetischer, ökonomischer und ökologischer Sicht beurteilt und mit der Entwicklung «Weiter wie bisher» verglichen. Abschliessend werden die massgeblichen Herausforderungen für die Umsetzung der Transformation festgehalten und die Empfehlungen formuliert, wie mit diesen Herausforderungen umgegangen werden kann.

2 Abfälle und Energie: Heutige Situation und erwartete Entwicklung

2.1 Abfallwirtschaft heute

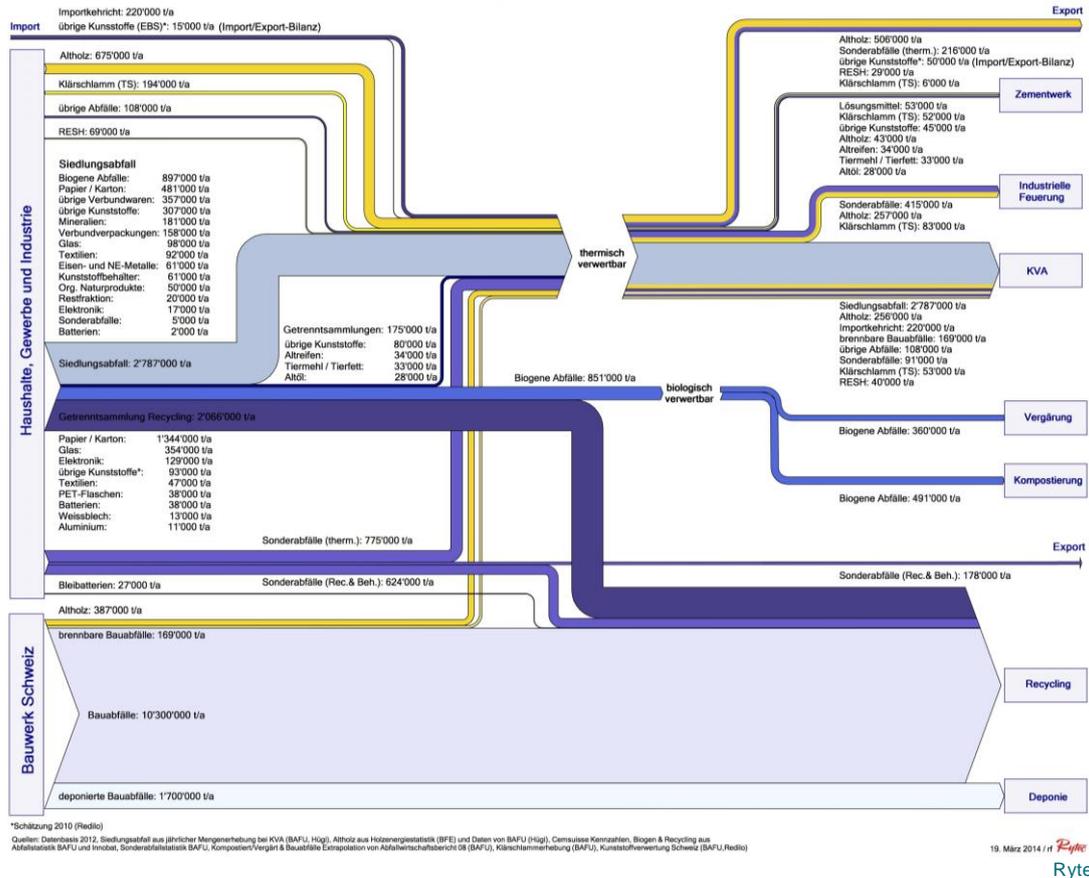
2.1.1 Massenströme der Schweizerischen Abfallwirtschaft

Eine umfassende Darstellung der Schweizer Abfallwirtschaft liefert der Abfallwirtschaftsbericht 2008 (Hügi Gerber 2008). Er stellt die Situation in den Jahren 2005-2007 detailliert dar. Jährlich werden aktualisierte Grafiken in den Kernbereichen veröffentlicht. Im Rahmen des Energie Dialogs Schweiz hat eine industrienaher Teilgruppe das Papier «Optimale Nutzung der Energie aus Abfällen» (Liechi J. 2009) publiziert. Die dort sorgfältig recherchierten und in den einleitenden Kapiteln angestellten Überlegungen zu den Mengenverhältnissen und den entsprechenden Plausibilisierungen werden für diese Studie als Grundlage verwendet.

Energetisch relevante Massenflüsse

Die folgende Übersichtsgrafik stellt die Massenflüsse im Abfallbereich im Jahr 2012 dar. Mengenmässig fallen die Abfälle aus der Bautätigkeit (Bauabfälle und unverschmutzter Aushub) sehr ins Gewicht. Aus einer energetischen Sichtweise kann der Massenstrom auf die brennbaren Anteile reduziert werden. Die Sonderabfälle und der Klärschlamm sind, je nach Verwertungsweg und Trocknungsart, energetisch relevant. Speziell interessieren die Siedlungsabfälle, da ihre Verwertungsinfrastruktur bereits für die Energiebereitstellung ausgerüstet ist.

«Masseninhalte der Abfallströme 2012»



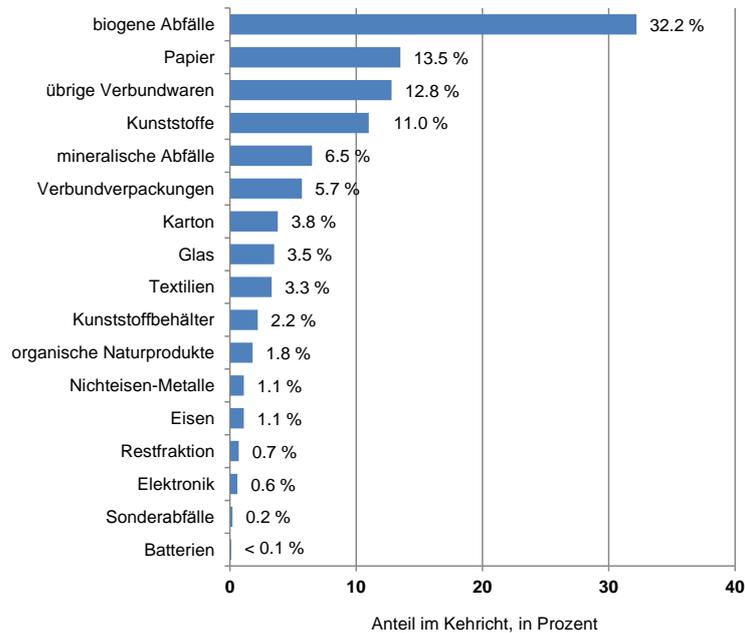
Figur 1: Darstellung der Massenströme in der Schweizer Abfallwirtschaft in Tonnen pro Jahr. Werte 2012. Die Anhänge 4 und 5 zeigen sämtliche Sankey-Diagramme in vergrösserter Darstellung.

Die Entwicklung der Siedlungsabfallmenge verläuft parallel zum BIP, wie die Abbildung in Anhang A-2 illustriert. Seit kein unbehandelter Siedlungsabfall mehr auf Deponien gelangen darf, teilt sich der Strom in die Verwertung und in die Verbrennung.

Der Zuwachs der Abfallmengen wurde in den letzten Jahren grösstenteils durch die gesteigerten Recyclingraten aufgefangen. In wie weit bei den Recyclingraten bereits eine «Sättigung» eingetreten ist, ist schwierig abzuschätzen. Im Modell gehen wir von einer moderaten jährlichen Steigerung um 0.4% bis auf maximal 60% für die Gesamtrecyclingrate (inkl. Grüngut) aus. In Anhang A-3 ist die Entwicklung der Schweizer Recyclingraten dargestellt.

Auf der anderen Seite ist auch von Interesse, was in den verbrannten Mengen an potentiell rezyklierbaren Fraktionen noch enthalten ist. Die Zusammensetzung des Siedlungsabfalls in den Kehrichtsäcken wurde in den Jahren 2011/2012 detailliert untersucht (BAFU 2013). Die untenstehende Grafik zeigt einen hohen Anteil an biogenen Abfällen, der eventuell einer Vergärung zugeführt werden könnte.

«Zusammensetzung des Kehrichts in der Schweiz»



BAFU

Figur 2: Kehrichtzusammensetzung in Kehrichtsäcken. Gewichtsprozente, BAFU 2013.

Auch im Bereich der Kunststoffe stellt sich die Frage nach dem Recyclingpotential. Die vielen verschiedenen Kunststoffarten und die oftmals grosse Verschmutzung machen ein Aussortieren aus dem Siedlungsabfall fast unmöglich. Eine getrennte Sammlung von Kunststoffbehältern ist aktuell in Prüfung, wird jedoch (wie die PET-Sammlung) mit sehr hohen spezifischen Kosten zu kämpfen haben (wenig Gewicht pro Volumen und damit hohe Logistikkosten).

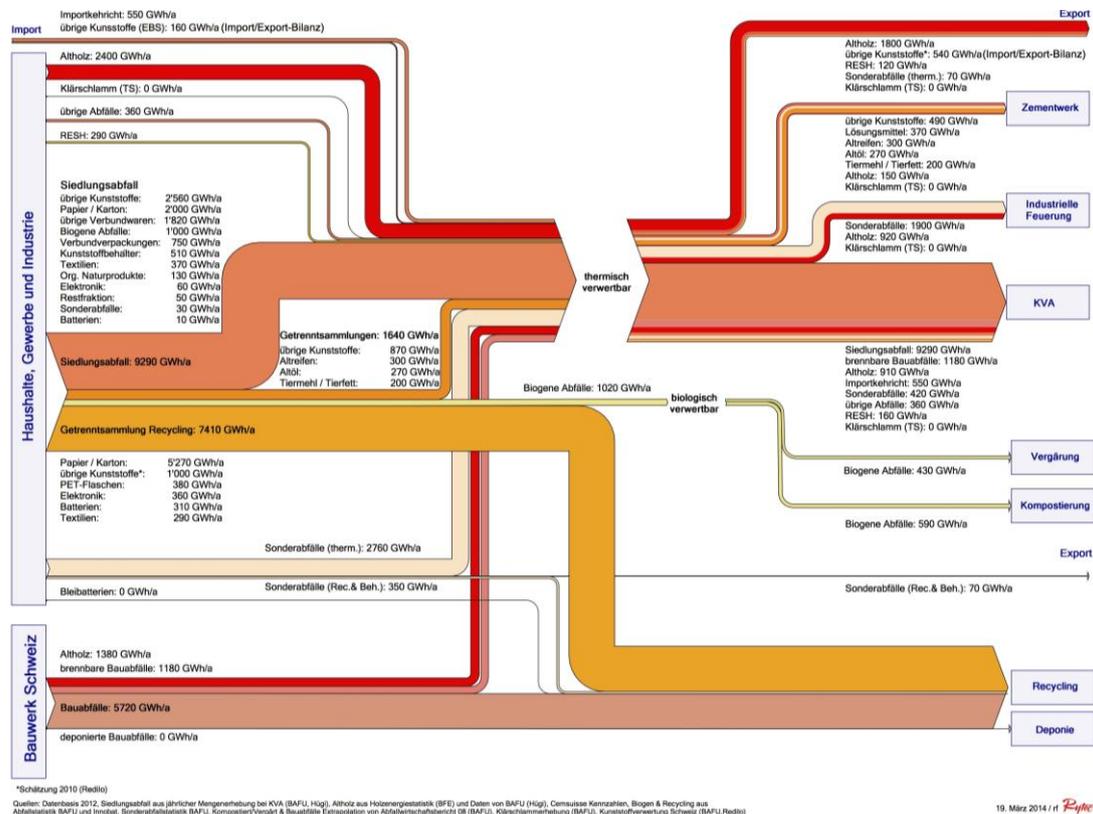
Verwertungswege, Massen- und Energieflüsse der Schweizer Abfallwirtschaft

Die Verwertungswege in der Schweiz sind weitestgehend gesetzlich geregelt. Für Abfälle aus den Haushalten und «siedlungsabfallähnliche Abfälle» aus dem Gewerbe hat die Gemeinde die Entsorgungsverantwortung. Sie berechnet dem Bürger dafür meist eine Grundgebühr zur Deckung der Sammelkosten und eine volumen- oder gewichtsabhängige Gebühr (z.B. Sackgebühr). Für Grüngut kann eine separate Sammlung angeboten werden, teilweise werden auch dort gewichtsabhängige Gebühren verrechnet. Produktionsabfälle aus Industrie und Gewerbe müssen die Betriebe in eigener Verantwortung gemäss den geltenden Vorschriften entsorgen. Es gibt daher öffentliche (= klar einer Verwertungsschiene und –anlage zugeordnete) und private (= sich nach Marktmechanismen verlagernde) Abfallströme. In den Diagrammen sind die Ströme wieder zusammengefasst, da für eine Unterscheidung keine zureichenden Daten vorhanden sind.

Die Schweizer Abfallströme bis zur ersten Behandlungsanlage sind in untenstehender Grafik basierend auf dem Energiegehalt der Abfallfraktionen dargestellt. Die Angaben entsprechen der in einer energetischen Nutzung freiwerdenden Energie, also dem Heizwert des entsprechenden Abfalls. Die Effizienz der Anlage wird in dieser Darstellung

nicht betrachtet. (Sämtliche Energie- und Massenflussdiagramme sind in den Anhängen A-4 und A-5 in grösserem Format abgebildet.)

«Energieinhalt der Abfallströme»



Figur 3: Energieflüsse in GWh pro Jahr, die für eine optimierte Energienutzung betrachtet werden können (Stand 2012). Eine vergrösserte Darstellung befindet sich im Anhang A-5.

Obwohl der Energiestrom in die KVA der bedeutendste ist, ist die Summe der verbleibenden Energieströme grösser als die heute in KVA behandelten Mengen. Daher stellt sich für die Bearbeitung der aktuellen Studie als grösste Frage, in welcher Anlagenart die Abfälle mit welcher Effizienz und welchem Energie-Nutzen verwertet werden können.

Wegen ihren grossen Energieinhalten und der Eignung zur thermischen Nutzung müssen folglich die Energieströme aus Altholz, Sonderabfall, Kunststoffen und Importkehricht spezieller betrachtet werden.

Zu beachten ist, dass für Tiermehl/Tierfette und Klärschlamm die Verwertung neu geregelt wird. Nachdem seit 2006 ein Ausbringungsverbot gilt, wurde der Klärschlamm direkt oder getrocknet verbrannt. Die aktuell in Überarbeitung stehende TVA wird fordern, den in Klärschlamm und tierischen Nebenprodukten enthaltenen Phosphor nicht permanent aus dem Nährstoffkreislauf zu entfernen, sondern diese Abfälle in geeigneten Anlagen zu behandeln und die Rückstände als Phosphor-Mine der Zukunft in speziellen Deponie-kompartimenten abzulagern, bis ein Recyclingverfahren die technische und wirtschaftliche Reife erlangt hat.

Der Altholzstrom alimentiert inländische Industrief Feuerungen. Ein beachtlicher Teil geht ins Ausland, sei es zur stofflichen oder energetischen Nutzung (z.B. Spanplatten bzw. thermische Holzverstromung).

Die bereits heute separat erfassten biogenen Abfälle gehen erst zu einem kleinen Teil in die energetische Nutzung, grösstenteils werden sie kompostiert. Es ist weiterhin stark umstritten, welche Art der energetischen Nutzung (Verbrennung oder Vergärung mit anschliessender Kompostierung) den grössten ökologischen Nutzen bringt. Da die Energieströme verhältnismässig gering sind, muss diese Studie dazu keine abschliessende Aussage machen.

Die Kategorie der Sonderabfälle lässt gut erkennen, dass die Kategorien jeweils viele Unterelemente enthalten. So unterscheiden sich die Verwertungswege je nach Art des Sonderabfalls (z.B. RESH in KVA, Lösungsmittel in Zementwerke).

Dem Recycling wird – neben den Bauabfällen – vor allem Papier- und Karton zugeführt. Das Recycling von Bauabfällen (Aufbereitung der mineralischen Anteile zu Sekundärkies) ist für die vorliegende Arbeit nicht relevant und wird deshalb nicht mehr weiter betrachtet. Aus den Recyclingprozessen gibt es immer auch schlecht definierte aber energiereiche Restfraktionen, die der Verbrennung zugeführt werden müssen.

Import-/Exportströme von Abfällen

Der Massenstrom «Importkehricht» besteht hauptsächlich aus Abfällen in grenznahen Regionen (Bodenseeregion, Vorarlberg, Region um Genf, Basel). Dabei handelt es sich meist um regional optimierte Einzugsgebiete des Abfalls und nicht um energetisch motivierte Importe von abfallstämmigen Brennstoffen. Die Diskussion um die Energie- und CO₂-Komponenten (und damit Konsequenzen) dieser Abfallimporte ist erst angelaufen. Einzelne Sonderabfallfraktionen müssen exportiert werden, weil in der Schweiz keine entsprechend ausgerüsteten Anlagen / Deponietypen verfügbar sind¹.

Der Export von Holzabfällen erfolgt hauptsächlich nach Italien und Deutschland und zu einem kleineren Teil nach Österreich und Frankreich. Früher wurden diese stark in der Spanplattenproduktion eingesetzt, heute werden sie verstärkt energetisch genutzt. Auch Anteile des RESH werde im Ausland entsorgt.

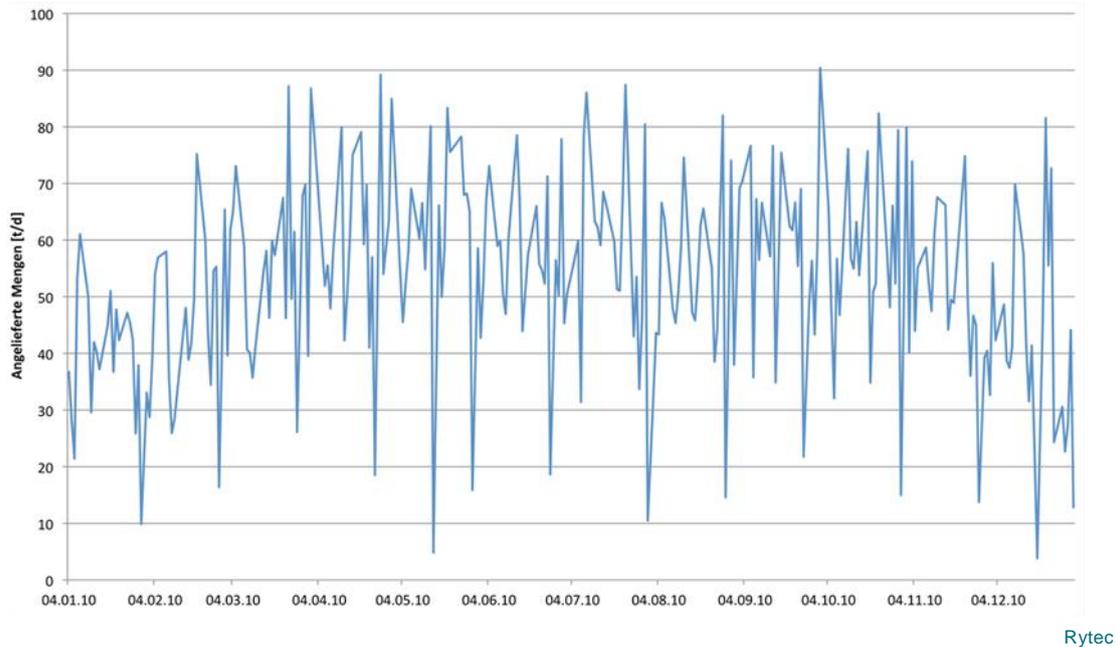
Zeitliche Variation der Abfallströme

Einige wichtige Abfallströme zeigen erkennbare periodische Schwankungen, die für ein «energieoptimiertes» System zu berücksichtigen sind.

Die Anliefermengen schwanken von Tag zu Tag. Sie sind auch stark von den Öffnungszeiten der Anlage abhängig. Anlagen mit elektronischer Identifikationsmöglichkeit auf der Waage können Abfälle praktisch rund um die Uhr annehmen und zeigen einen stetigeren Verlauf. Im Jahrgang erkennt man eine abgeschwächte Anlieferung in den Wintermonaten.

¹ Die Schweizer Abfallbehörden erteilen dann Exportbewilligungen für Abfälle, wenn in der Schweiz keine entsprechenden Entsorgungsmöglichkeiten zu wirtschaftlich darstellbaren Preisen bestehen (Autarkie-Gedanke).

«Jahresverlauf der täglich angelieferten Mengen in einer KVA»



Figur 4: Beispielhafte Darstellung der Anlieferschwankungen einer Schweizer KVA (Tageswerte Mo-Sa). Samstage sind anlieferschwach, ein Wochenrhythmus (Sammelkalender!) ist auch erkennbar. Die KVA haben deswegen im Bunker eine Lagerkapazität von mindestens 3-5 Tagen.

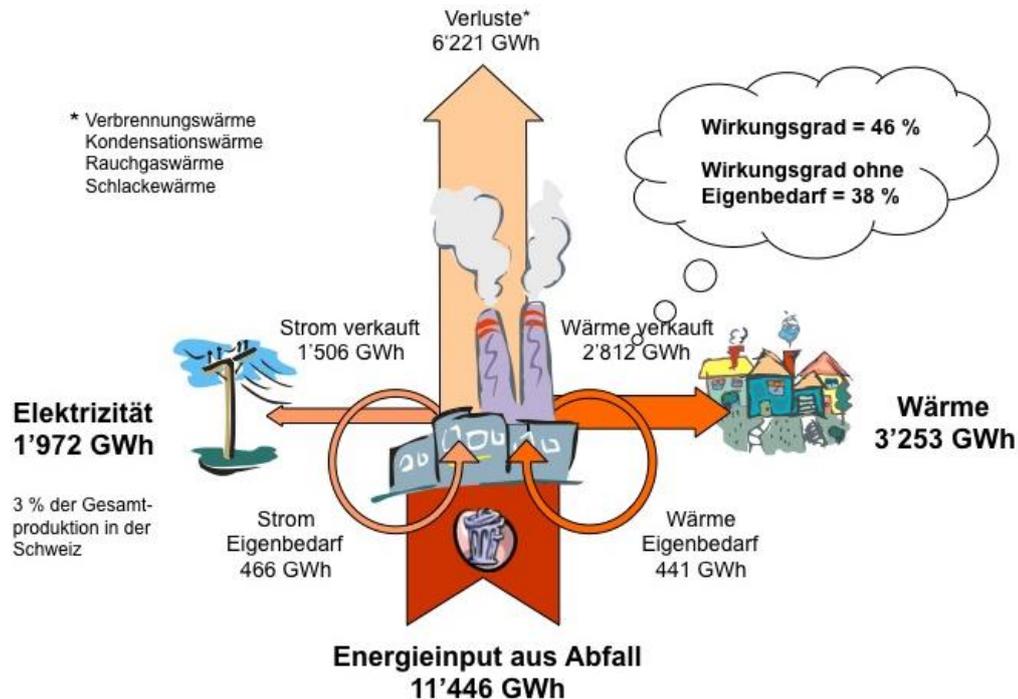
Durch die verringerte Bautätigkeit in den Wintermonaten schwächt sich der Anfall von brennbaren Abfällen in den Monaten Dezember bis Februar ab. Damit läuft die Abfallverfügbarkeit der Energienachfrage entgegen. Gerade in kalten Wintern wären jedoch die Abfallanlagen mit Fernwärmeeinspeisung sehr interessiert, ihre Anlagen voll auszulasten, da sonst im Fernwärmenetz teure fossile Energie verfeuert werden muss. Teilweise wird in diesen Monaten Landschaftspflegeholz zum Nulltarif angenommen, um die Energieproduktion konstant halten zu können.

Noch extremer stellt sich die Situation in einer Grüngut-Anlage dar. Hier muss zusätzlich beachtet werden, dass im Winter hauptsächlich trockenes, holziges Material angeliefert wird, was meist nur als Strukturmaterial dienen kann. Die vergärbaren Mengen kommen erst mit Beginn der Vegetationsperiode wieder auf die Anlage. Der Jahresverlauf der angelieferten Abfallmengen auf einer KVA bzw. einer Vergärungsanlage ist beispielhaft in Anhang A-6 abgebildet.

2.1.2 Energieeffizienz der Abfallanlagen

Die Energieeffizienz des KVA-Anlagenparks im Jahr 2012 ist in der folgenden Grafik dargestellt. Dank Effizienzverbesserungen auf vielen Anlagen steigen die Werte in den nächsten Jahren.

«Energiefluss der Schweizer KVA 2012»



BAFU modifiziert

Figur 5: Illustrative Darstellung der Energieströme durch Schweizer KVA im Jahr 2012. Durch Optimierungsmassnahmen wird der Gesamtwirkungsgrad laufend gesteigert. Der Wirkungsgrad (ohne Eigenbedarf) beträgt heute bei der Elektrizität 13% und der Wärme 25%.

Die Stromproduktion bringt thermodynamisch bedingt (Wirkungsgrad Carnot-Dampfprozess) erhebliche Verluste mit sich. Wegen den korrosiven Eigenschaften des Rauchgases aus dem Abfall kann – im Vergleich z.B. zu Kohlekraftwerken – nicht mit den gleich hohen Dampfparametern gearbeitet werden. Darum muss für die Szenarienarbeit eine begründete Nutzungskaskade erarbeitet werden (siehe Kapitel 5.2)

2.1.3 Einfluss- und Steuerungsgrössen Schweizer Abfallwirtschaft

Eine wirkungsvolle Transformation der Abfallwirtschaft hin zu einer «hohen und zeitlich optimierten Energieausnutzung» kann dann entwickelt werden, wenn die Einflussgrössen bekannt sind, anhand welcher das System in den zukünftigen Zustand gelenkt wird. Die untenstehende Liste stellt diese Grössen zusammen und zeigt jeweils die Hypothese zur angenommenen un gelenkten Entwicklung (Szenario «Weiter wie bisher»).

Systemexterne Einflussgrössen

Wirtschaftsentwicklung (BIP)

Höherer Wohlstand bedeutet höherer Materialumsatz. Aktuell praktisch parallele Entwicklung der Abfallmengen zum steigenden BIP. – Annahme für das Szenario «Weiter wie bisher»: Wachsendes BIP (SECO 2011, in Prognos 2012a verwendet).

Bevölkerungswachstum

Jeder zusätzliche Einwohner produziert zusätzlichen Abfall. Aktuell wächst die Schweiz dank der Zuwanderung aus dem Ausland. – «Weiter wie bisher»: Fortgesetztes Bevölkerungswachstum.

Marktpreise Wärme und Strom

Die Energiepreise bestimmen die Wirtschaftlichkeit von Abwärmenutzungs- und Effizienzoptimierungsmassnahmen. Sie werden auch durch Lenkungsabgaben bzw. Emissionshandelssysteme im Bereich CO₂ beeinflusst. – «Weiter wie bisher»: Keine substantielle Internalisierung externer Kosten, daher geringe Zahlungsbereitschaft für weitergehende Optimierungsmassnahmen.

Erträge Regelenergie

Wetterabhängige Energieerzeugungsanlagen (Solaranlagen, Windkraftwerke) führen zu Produktionsschwankungen, welche ausgeglichen werden müssen. Die Preise, welche für die Regelleistung gezahlt werden, sind für KVA durchaus attraktiv, da kaum zusätzlicher Aufwand entsteht. – «Weiter wie bisher»: Weniger als die Hälfte des technischen Potentials wird realisiert.

Systeminterne Einflussgrössen innerhalb der Abfallwirtschaft*Recyclingraten für stoffliches Recycling*

Nur die Restmengen aus dem stofflichen Recycling stehen für die energetische Nutzung zur Verfügung. Aktuell sind die Recyclingraten pro Fraktion in etwa stagnierend (Grüngut steigend), evtl. werden neue Fraktionen rezykliert (z.B. Kunststoff). – «Weiter wie bisher»: Leicht steigende Gesamtrecyclingrate.

Entsorgungspreis

Bei Wahlfreiheit werden Verwertungswege nach rein ökonomischen Kriterien gewählt. Gegenwärtig sinken die Entsorgungspreise im Bereich der energetischen Nutzung. Die stoffliche Verwertung wird wegen der nötigen Separatsammlung und/oder Sortieraufwendungen vergleichsweise teurer und verliert Mengen. – «Weiter wie bisher»: Die Entsorgungspreise bleiben stabil, die Stoffströme werden nicht wesentlich beeinflusst.

Voll- statt Nominalauslastung

Investitionen in Abfallbehandlungsanlagen bedeuten Kapitalkosten, welche sich im Behandlungspreis niederschlagen. Bei Nominallast resultieren vertretbare Behandlungspreise. Bei Vollauslastung sinken diese. – «Weiter wie bisher»: Vollauslastung der Anlagen wie heute schon üblich.

Politische Lenkungsmöglichkeiten*Ökologische Zielvorgaben*

Abfallströme können mit gesamtökologischen Argumenten entgegen dem Preisgefälle gelenkt werden (z.B. Kompostierung vs. KVA: 150 CHF/t vs. 120 CHF/t, Separatsamm-

lung Kunststoff 1200 CHF/t) – «Weiter wie bisher»: kein spürbarer Effekt solcher Zielvorgaben.

Energetische Zielvorgaben

Bereits die gültige TVA schreibt die Abwärmenutzung aus der Kehrlichtverbrennung vor. Sie macht jedoch keine Effizienzvorgaben. Bau- und Betriebsbewilligungen von Abfallanlagen können an energetische Minimalkriterien geknüpft werden oder über Grossverbrauchervereinbarungen eingefordert werden. – «Weiter wie bisher»: Moderate Steigerung der Energieeffizienz um 5-10% bis 2035 durch Vorgaben der neuen TVA.

Koordinierte Abfallplanung

Eine funktionierende überregionale Abfallplanung würde (wie z.B. Kanton Zürich) auch energetische Kriterien für die Anlagen- und Standortentwicklung vorgeben – «Weiter wie bisher»: Fragmentierung verhindert die Koordination.

Import- / Exportbeschränkungen

Heute werden internationale Abfallströme als «Problemstoffe im Grenzverkehr» betrachtet. Noch fehlt die Sichtweise als Energie- und Ressourcenströme weitgehend. – «Weiter wie bisher»: Keine Veränderung.

2.2 Energiewirtschaft heute und 2035

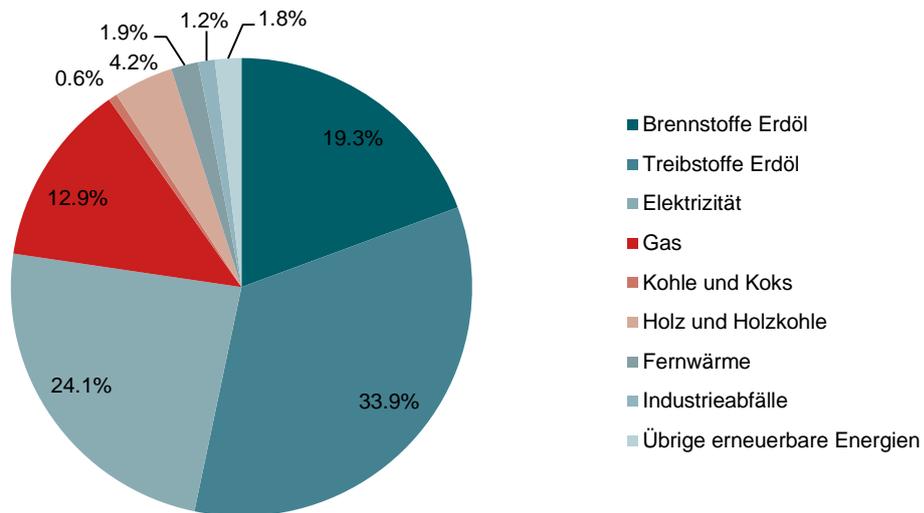
Die Energiestrategie 2050 des Bundesrats legt fest, wie der etappenweise Umbau des Energiesystems nach dem Ausstieg aus der Kernenergie bis im Jahr 2050 erfolgen soll. Um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, setzt der Bundesrat im Rahmen der Energiestrategie auf verstärkte Energieeffizienz, den Ausbau der Wasserkraft und der neuen erneuerbaren Energien sowie wenn nötig auf fossile Stromproduktion (Wärme- kraftkopplungsanlagen, Gaskombikraftwerke) und/oder Importe. Ziel ist es, den Endenergieverbrauch bis 2035 auf rund 152 TWh pro Jahr zu reduzieren (Prognos 2012a). Die in diesem Bericht verwendeten Zukunftsprognosen stützen sich weitgehend auf den Grundlagenbericht «Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050» des Bundesamts für Energie (Prognos 2012a) sowie auf die «Botschaft des Bundesrats zum ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050». Es werden die Werte des Szenarios «Neue Energiepolitik» (NEP) verwendet.

Die folgenden Kapitel geben einen Überblick über den gesamten heutigen Energieverbrauch, sowie den Verbrauch und die Produktion von Wärme und Elektrizität in der Schweiz. Sie zeigen den Beitrag der Abfallwirtschaft zur heutigen Energieversorgung. Zudem werden Szenarien zur Energiesituation im Jahr 2035 betrachtet, als Grundlage zur Beantwortung der Frage, welchen Beitrag die Abfallwirtschaft zukünftig zur Energieversorgung leisten soll.

2.2.1 Überblick Energieverbrauch heute

Der Endenergieverbrauch der Schweiz betrug im Jahr 2012 245'000 GWh (BFE 2013c). Davon fallen rund ein Drittel auf den Treibstoffverbrauch, ein Viertel auf den Elektrizitätsverbrauch und ein Fünftel auf den Brennstoffverbrauch.

«Endenergieverbrauch 2012»



econcept

Figur 6: Endenergieverbrauch nach Energieträgern im Jahr 2012 (BFE 2013c)

2.2.2 Wärme heute und 2035

Ausgangslage

Im Jahr 2011 betrug der Wärmeverbrauch² rund 88'600 GWh, was etwa einen Drittel des gesamten Energieverbrauchs ausmacht. Davon wurden 68% für Raumwärme, 20% für Prozesswärme und 12% für Warmwasser genutzt. Der Raumwärmeverbrauch hat seit dem Jahr 2000 um etwa 15% abgenommen; der Warmwasserverbrauch blieb beinahe konstant. Der Verbrauch von Prozesswärme ist um 1.2% leicht angestiegen (Prognos 2012b).

Der durchschnittliche Wärmeverbrauch schwankt während eines Tages, mit einer Leistungsspitze am Morgen und im Laufe des Tages sinkendem Verbrauch. Dies ist in Anhang A-7 anhand eines typischen Verlaufs des Leistungsbedarfs eines Fernwärmenetzes dargestellt. Der Leistungsbedarf schwankt zwischen 80% während der Nacht und 140% beim Aufheizbetrieb am Morgen.

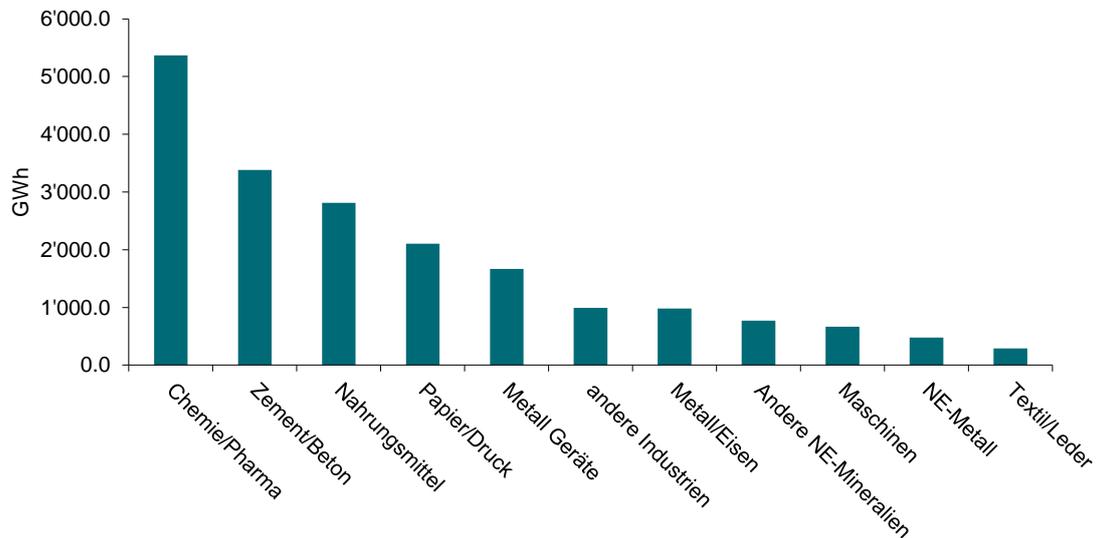
Verbrauch von Prozesswärme

Die nachfolgende Grafik illustriert den Prozesswärmebedarf nach Branchen. Wird der Verbrauch pro Betrieb betrachtet, haben Zementwerke mit Abstand den höchsten Wärmeverbrauch.

² Brenn- und Treibstoffverbrauch, inkl. Fern-, Umwelt- und Solarwärme, ohne elektrische Wärmeproduktion

meerverbrauch (Bachmann 2013) (s. auch Anhang A-8). Da diese Betriebe sehr hohe Temperaturen benötigen, kann dafür keine Abwärme aus der thermischen Abfallverwertung in KVA genutzt werden. In gewissen Produktionsprozessen können bestimmte Abfallarten jedoch direkt als Brennstoff eingesetzt werden.

«Wärmeverbrauch nach Industriebranchen 2012»



econcept

Figur 7: Jährlicher Verbrauch von thermischer Energie pro Branche 2012 (Bachmann 2013)

Betrachtet man den Gesamtwärmeverbrauch pro Industriebranche, liegt die Chemie- und Pharmabranche an der Spitze, gefolgt von der Zement-/Betonindustrie³ sowie der Nahrungsmittelindustrie.

Eine Schätzung dazu, welche Einzelunternehmen einen hohen thermischen Energiebedarf aufweisen, lässt sich anhand des nationalen Emissionshandelsregisters⁴ bzw. der CO₂-Emissionen pro Unternehmen ableiten. Im Register sind alle von der CO₂-Abgabe befreiten Unternehmen (sowie weitere Unternehmen, die am Emissionshandel teilnehmen) eingetragen. Im nationalen Allokationsplan der Periode 2008-2012 sind die zugeordneten Emissionsrechte pro Unternehmen dokumentiert und öffentlich zugänglich. Auch die im Monitoring erhobenen effektiven Emissionen können über den nationalen Allokationsplan abgerufen werden. Gemäss dem Monitoring für das Jahr 2012 gehören die Unternehmen mit den höchsten CO₂-Emissionen der Zement-, Chemie-/Pharma-, Nahrungsmittel-, Stahl-, Papier- und Glasindustrie an. Die demnach 25 grössten Energieverbraucher im Jahr 2012 sind in Anhang A-9 zusammengestellt.

³ Die Zementindustrie und Betonindustrie werden in der Statistik als gemeinsame Branche geführt; einen hohen Energieverbrauch weisen jedoch nur die Unternehmen der Zementindustrie auf.

⁴ www.national-registry.ch

Wärmeverbrauch 2035

Gemäss NEP-Szenario nimmt der gesamte Wärmeverbrauch (Raum-/Prozesswärme/Warmwasser, ohne elektrische Produktion) bis im Jahr 2035 um 26% ab. Er beträgt weiterhin rund 40% des totalen Energieverbrauchs. Der Verbrauch von Raum- und Prozesswärme nimmt um 30% bzw. 20% ab, der Warmwasserverbrauch sinkt um 11% (Prognos 2012a).

Bei einer Abnahme des gesamten Raumwärmeverbrauchs ist davon auszugehen, dass sich auch der Tagesverlauf der Wärmeabgabe von Fernwärmenetzen (vgl. Anhang A-7) verändern wird. Aufgrund zukünftig geringeren Wärmeverlusten dank besser isolierten Gebäudehüllen kann angenommen werden, dass die heutigen Verbrauchsspitzen für den Aufheizbetrieb in Zukunft weniger markant ausfallen werden, da der Warmwasserbedarf einen bedeutenderen relativen Anteil am Wärmebedarf hat.

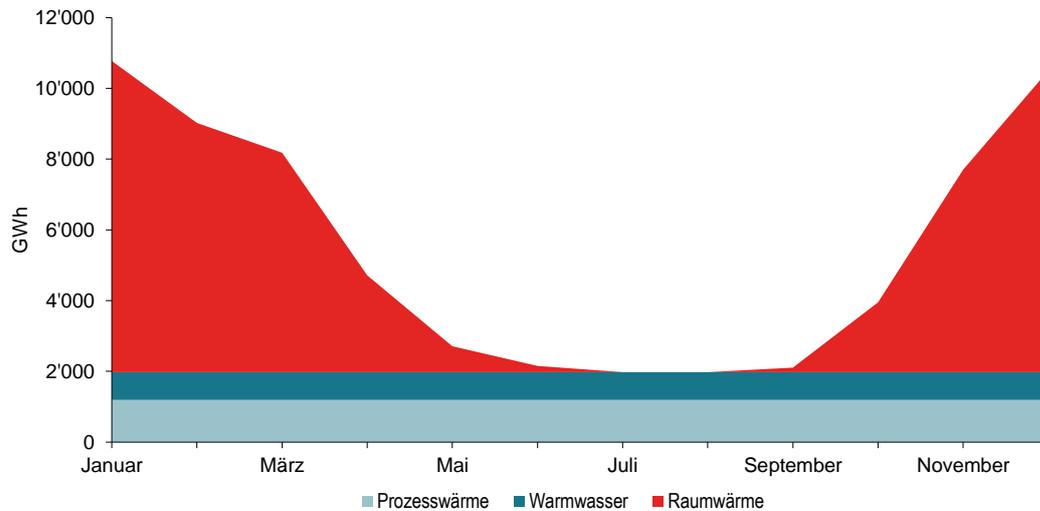
Wärmeverbrauch in GWh	2011	2035	Abnahme in %
Raumwärme	60'088	42'031	-30%
Warmwasser	10'529	9'417	-11%
Prozesswärme	17'974	14'307	-20%
Wärmeverbrauch total	88'590	65'755	-26%

Tabelle 2: Wärmeverbrauch 2011 und 2035, Szenario «Neue Energiepolitik» (Prognos 2012a)
(Energieverbrauch total: 2011 209'400 GWh, 2035 152'500 GWh)

Es wird davon ausgegangen, dass der Verbrauch von Warmwasser und Prozesswärme ganzjährig konstant ist. Der monatliche Raumwärmeverbrauch wurde anhand der Heizgradtage gemäss SIA 381/2⁵ modelliert. In Figur 6 ist der Verlauf des Wärmeverbrauchs für das Jahr 2035 dargestellt.

⁵ SIA 381/2 Klimadaten zu Empfehlung 380/1 «Energie im Hochbau»; Klimaregion 3, Standort Zürich-Stadt

«Wärmeverbrauch pro Monat 2035»



econcept

Figur 8: Szenario «Neue Energiepolitik»: Wärmeverbrauch (Raumwärme/Warmwasser/Prozesswärme, ohne elektrische Produktion) in GWh pro Monat 2035

Trends der zukünftigen Entwicklung

Auf Seite der Wärmenachfrage wird sich das geforderte Temperaturniveau verändern. Energetisch erneuerte Gebäude verfügen meist über Niedertemperaturheizsysteme, die mit geringen Vorlauftemperaturen auskommen. Einzig für die Warmwassererzeugung müssen noch Temperaturen über 50°C zur Verfügung stehen.

Es werden deshalb vermehrt sogenannte Anergienetze erstellt werden, welche die Energie auf oder knapp über dem Niveau der Umgebungswärme verteilen und eine dezentrale Nutzung mit Wärmepumpen (bzw. Kältemaschinen für die Kälteerzeugung) erfolgt. In diese Anergienetze wird Abwärme aus unterschiedlichen Quellen eingespeist.

Dabei ist allerdings zu beachten, dass bei tiefen Fernwärme-Vorlauftemperaturen (z.B. 45°C) die Leitungsquerschnitte schnell grösser werden⁶. Bereits die Erhöhung der Vorlauftemperatur um 10°C bringt rund 30% Einsparung bei den Leitungskosten.

2.2.3 Elektrizität heute und 2035

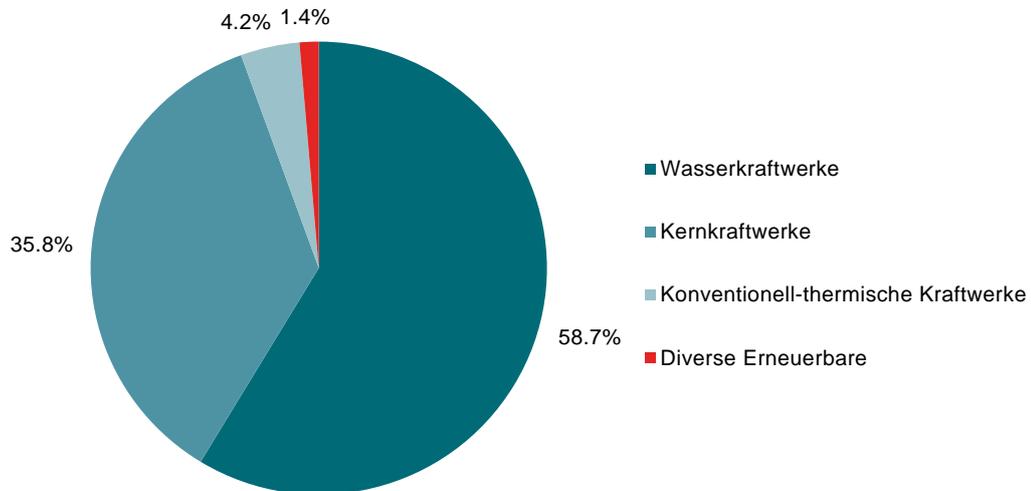
Ausgangslage

Der gesamte Elektrizitätsverbrauch lag im Jahr 2012 bei rund 59'000 GWh. Dies sind 13% mehr als im Jahr 2000. Die jährliche Nettoproduktion von Elektrizität betrug 65'600 GWh (BFE 2013c).

6

Eine Lieferung von 15 MW auf einem Temperaturniveau von 45°C (Rücklauf 35°C) benötigt einen Leitungsquerschnitt von 50cm (DN500) und einen entsprechend grossen Graben für die Verlegung der Vor- und Rücklaufleitung.

«Elektrizitätsproduktion 2012»

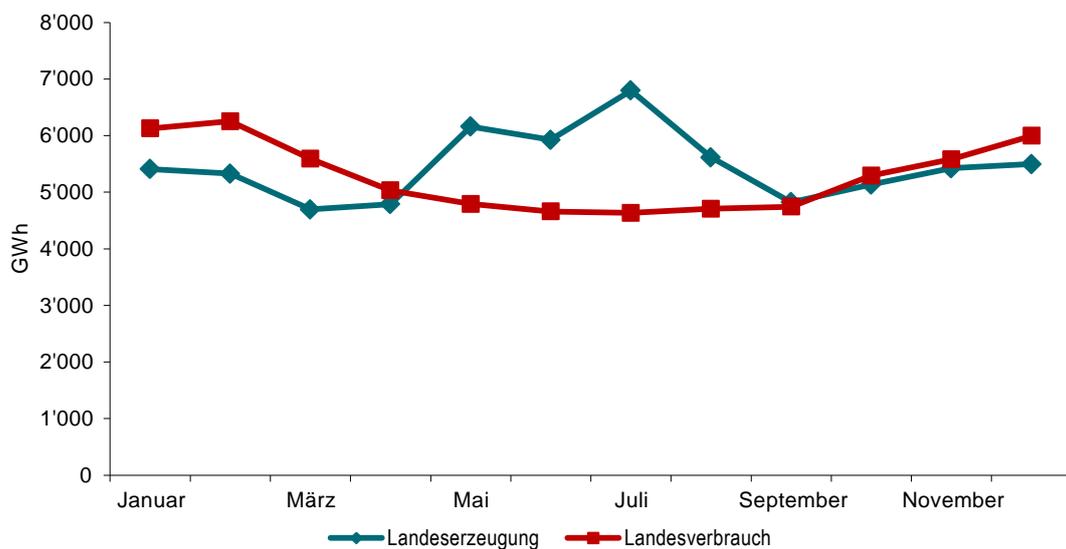


econcept

Figur 9: Elektrizitätsproduktion der Schweiz im Jahr 2012. Die Elektrizitätsproduktion aus KVA ist auf die Kategorien «Konventionell-thermisch» und «Diverse Erneuerbare» verteilt. (BFE 2013c)

Der Verlauf der monatlichen Elektrizitätsproduktion sowie des Verbrauchs ist in der nachfolgenden Grafik für das Jahr 2012 abgebildet. Die Darstellung zeigt, dass der Verbrauch während den Wintermonaten leicht über der inländischen Produktion liegt, während im Sommer die Produktion den Verbrauch stark übersteigt.

«Elektrizitätsproduktion und -verbrauch pro Monat 2012»



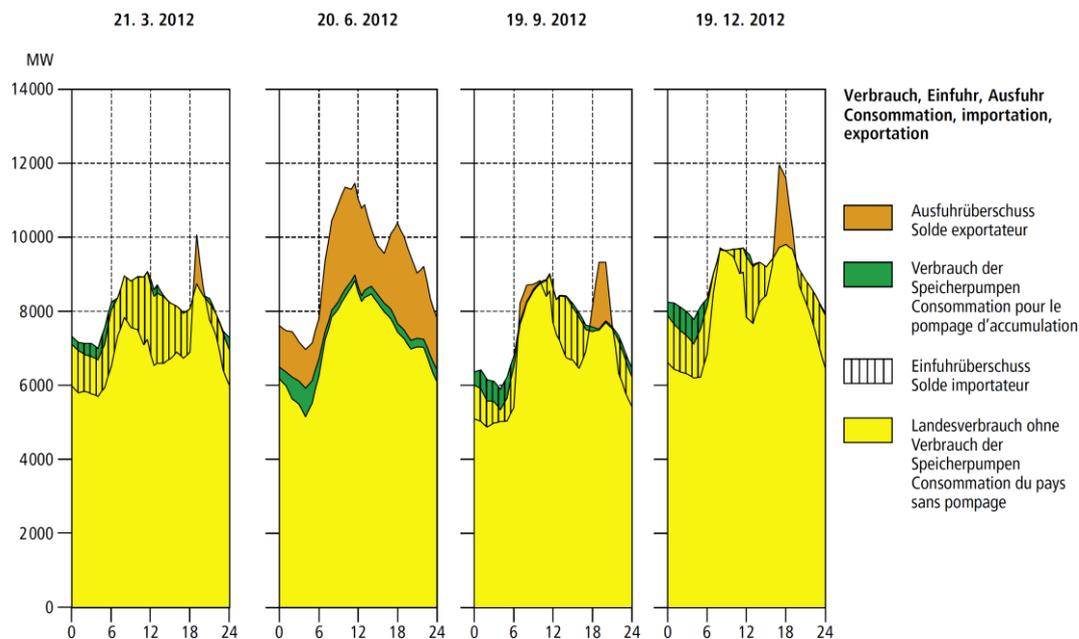
econcept

Figur 10: Gesamte Erzeugung (abzüglich Verbrauch der Speicherpumpen) und Verbrauch (inkl. Verluste) elektrischer Energie in der Schweiz (2012) (BFE 2013b)

Der Elektrizitätsverbrauch unterliegt nicht nur jahreszeitlichen Unterschieden, sondern variiert auch während eines Tages stark. Der Schwankungsbereich ist im Sommer aus-

geprägter als im Winter. Im Sommer besteht zudem ein markanter Peak über die Mittagszeit, welcher rasch wieder abfällt. Im Winter hingegen ist der Verbrauch während des Tages konstanter und fällt über Nacht langsam ab (s. Figur 11).

«Elektrizitätsverbrauch während eines Tages»



Elektrizitätsstatistik 2012

Figur 11: Belastungsverlauf am dritten Mittwoch des Monats (BFE 2013a)

Elektrizitätsverbrauch 2035

Gemäss dem NEP-Szenario bleibt der Elektrizitätsverbrauch in Zukunft mehr oder weniger konstant und liegt im Jahr 2035 bei einem Endverbrauch von rund 55 TWh⁷. Ziel ist es, dass die Jahresproduktion von Elektrizität aus neuen erneuerbaren Energien auf 14.5 TWh und diejenige aus Wasserkraft auf 37.4 TWh steigt (Botschaft des Bundesrats 2013).

Für den zukünftigen Elektrizitätsverbrauch wird angenommen, dass der Winteranteil wie stets in den letzten 20 Jahren ca. 55% am Endverbrauch beträgt (Prognos 2012a). Für die Leistungsnachfrage wird davon ausgegangen, dass sie in der Schweiz bei steigender Stromnachfrage proportional zunimmt (Prognos 2012a). Allerdings muss damit gerechnet werden, dass sich im gesamten europäischen Raum die Schwankungen der Lastspitzen verstärken werden, wenn der Anteil von erneuerbaren (nicht konstant verfügbaren) Energien zunimmt.

Die Gegenüberstellung des zukünftigen Elektrizitätsverbrauchs und der Produktion des bestehenden Kraftwerkparks (unter Berücksichtigung der Kapazitätsabgänge) zeigt, dass die Elektrizitätsnachfrage das inländische Angebot ab dem Jahr 2021 übersteigt (vgl.

⁷ Der Endverbrauch entspricht dem Landesverbrauch abzüglich der Übertragungs- und Verteilverluste.

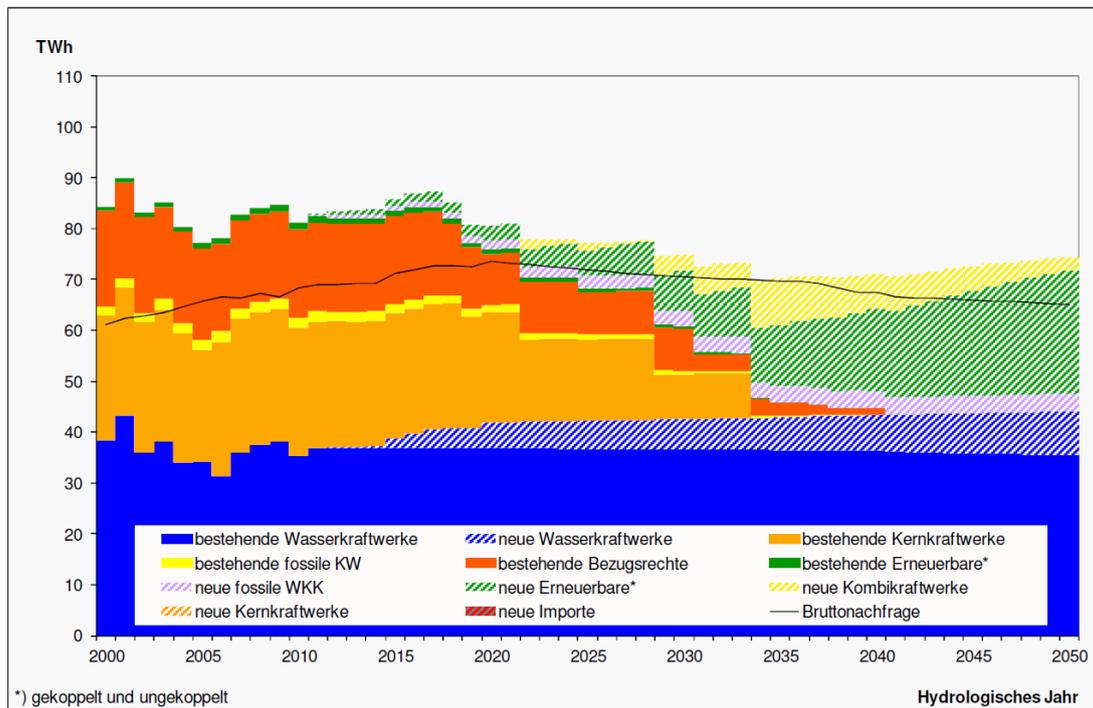
Figur 12). Hauptgründe dafür sind das Auslaufen von Bezugsrechten sowie die Stilllegung der Kernkraftwerke.

Für die Deckung des entstehenden Nachfrageüberhangs werden im Rahmen der Energieperspektiven innerhalb des NEP-Szenarios drei Angebotsvarianten untersucht (Prognos 2012a):

- Variante C: hoher Ausbau der fossilen Elektrizitätsproduktion im Inland (Gaskombikraftwerke (GuD) und fossile Wärmekraftkopplungsanlagen (WKK) und mässiger Ausbau der erneuerbaren Energien
- Variante C&E: hoher Ausbau der Erneuerbaren plus zusätzliche fossile Kraftwerke (GuD und WKK) im Inland
- Variante E: hoher Ausbau der Erneuerbaren plus zusätzliche Importe aus dem Ausland

Der Bundesrat hat sich in seiner Botschaft zur Energiestrategie im September 2013 klar für einen verstärkten Ausbau der erneuerbaren Energieproduktion (insbesondere der neuen Erneuerbaren zusätzlich zur Wasserkraft) ausgesprochen. Deshalb ist die Angebotsvariante C aus heutiger Sicht das unwahrscheinlichste Szenario. Zu welchen Anteilen zukünftig der Elektrizitätsbedarf, welcher nicht mit inländischen erneuerbaren Ressourcen erzeugt werden kann, tatsächlich durch Importe oder durch fossile Kraftwerke gedeckt wird, ist zum heutigen Zeitpunkt nicht bekannt. Allerdings wird eine zusätzliche Elektrizitätsproduktion aus der Abfallverwertung in beiden Fällen zur Substitution fossiler Ressourcen beitragen. Es werden daher im Rahmen dieser Arbeit die beiden Angebotsvarianten C&E sowie E als mögliche zukünftige Rahmenbedingungen in Betracht gezogen. Wie die zukünftige Elektrizitätsnachfrage durch neue Kapazitäten gedeckt werden kann, ist in Figur 12 für das NEP-Szenario, Angebots-Variante C&E, dargestellt.

«Perspektiven der Elektrizitätsversorgung: Szenario Neue Energiepolitik»



Energieperspektiven 2050

Figur 12: Szenario «Neue Energiepolitik», Variante C&E*: Perspektiven der Elektrizitätsversorgung, hydrologisches Jahr (TWh_{el}) (Prognos 2012a)

* Wird von Variante C ausgegangen, entspricht die gelbschraffierte Fläche «neue Kombikraftwerke» den «neuen Importen».

Wird nur das Sommerhalbjahr betrachtet, kommt es ab dem Jahr 2035 (für beide Angebotsvarianten C&E sowie E) zu deutlichen Produktionsüberschüssen im Vergleich zum Landesverbrauch. Im Winterhalbjahr ist die Produktion aus erneuerbaren Energien deutlich tiefer als im Sommerhalbjahr. Bei Variante C&E entsteht im Unterschied zu Variante E bei der Elektrizitätsversorgung im Winterhalbjahr keine «Versorgungslücke», sondern die Differenz zwischen Bedarf und Produktion aus Erneuerbaren wird durch fossile Quellen im Inland (anstatt durch Importe) abgedeckt. Die gesamte inländische Stromproduktion kann damit im Winterhalbjahr sogar höher sein als im Sommer. In der folgenden Tabelle sind die prognostizierten Werte für die Produktion und den Verbrauch im hydrologischen Jahr 2035 zusammengefasst.

Nettoerzeugung und Gesamtverbrauch			
Erzeugung	2010	2035 Variante C&E	2035 Variante E
Wasserkraftwerke	35.4 TWh	43.0 TWh	43.0 TWh
Kernkraftwerke	25.1 TWh	-	-
Fossile Kraftwerke	2.2 TWh	13.7 TWh	3.6 TWh
– bestehende fossile KW	2.2 TWh	0.3 TWh	0.3 TWh
– neue Kombikraftwerke	-	10.1 TWh	-
– neue fossile WKK	-	3.3 TWh	3.3 TWh
Erneuerbare	1.4 TWh	14.5 TWh	14.5 TWh
gesamte Erzeugung	64.1 TWh	71.2 TWh	61.1 TWh
Verbrauch Speicherpumpen	2.6 TWh	7.5 TWh	7.5 TWh
Nettoerzeugung	61.5 TWh	63.7 TWh	53.6 TWh
Nettoimport	2.1 TWh	-	3.6 TWh
Nettoexport	-	3.8 TWh	-
Landesverbrauch	63.6 TWh	59.9 TWh	59.9 TWh

Tabelle 3: Szenario «Neue Energiepolitik»: inländische Elektrizitätserzeugung und -verbrauch 2035 und Vergleich zu 2010, hydrologisches Jahr (TWh_{el} /a) (Prognos 2012a, Botschaft des Bundesrats 2013)

Trends der zukünftigen Entwicklung

Auf Grund des Ausbaus der neuen erneuerbaren Energien wird die Elektrizitätserzeugung volatil und noch etwas stärker in den Sommer verschoben. Ein Teil der Volatilität kann mittels Beeinflussung der Nachfrage (Smart Grids) aufgefangen werden. Die Nachfrage nach kurzfristig verfügbaren Leistungen (tageszeitliche Schwankungen wie auch Tertiärregelung) wird zunehmen. Die saisonale Nachfrage wird zu einer Zunahme des Strompreises in den Perioden mit einem Nachfrageüberschuss führen. Wie gross der Nachfrageüberschuss im Winter sein wird, hängt massgeblich von der Reduktion der Nachfrage im Winter (z.B. Elektroheizungen) und vom Ausbau von Produktionsanlagen mit Winterproduktion ab.

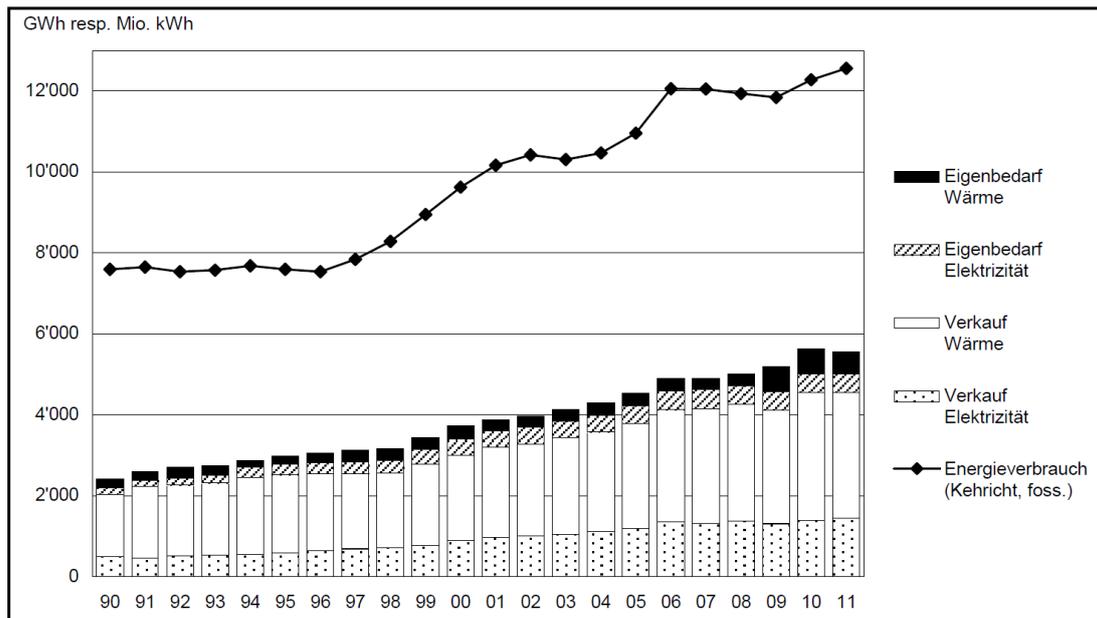
2.2.4 Energieproduktion der Abfallwirtschaft

Heutige Energieproduktion

Heute sind in der Schweiz 30 KVA in Betrieb, die Wärme und Strom produzieren. Im Jahr 2012 betrug die Produktion von nutzbarer Wärmeenergie aus Schweizer KVA ca. 3'300 GWh, wovon rund 2'800 GWh abgegeben wurden. Der Rest wurde zur Deckung des prozessbedingten Eigenbedarfs verwendet. Wird auch die direkte Nutzung von Abfällen als Brennstoff in Zementwerken sowie die Nutzung in industriellen Heizkraftwerken berücksichtigt, kommen rund 3'300 GWh Wärmenutzung hinzu. Der gesamte Anteil der Wärmeproduktion aus Abfällen beträgt also netto rund 7% des Schweizerischen Gesamtwärmeverbrauchs. Lokal kann die Wärmebereitstellung aus einer KVA für kleine Fernwärmenetze jedoch sehr bedeutend sein, wenn keine anderen Wärmequellen vorhanden sind (> 80%).

Die Elektrizitätsproduktion durch die KVA betrug im Jahr 2012 rund 2'000 GWh, wovon ca. 1'600 GWh abgegeben werden konnten. Die weiteren Beiträge aus Abfällen zur Elektrizitätsproduktion sind vernachlässigbar. Somit trägt die Elektrizitätsabgabe der Abfallwirtschaft heute etwa 2.5% zur gesamten Elektrizitätsproduktion bei. Seit 1990 hat sich die von den KVA abgegebene Wärmemenge etwa verdoppelt, die Elektrizitätsmenge verdreifacht (BFE 2013c). Diese Entwicklung ist in Figur 13 dargestellt.

«Eigenbedarf und Verkauf von Wärme und Elektrizität der KVA»

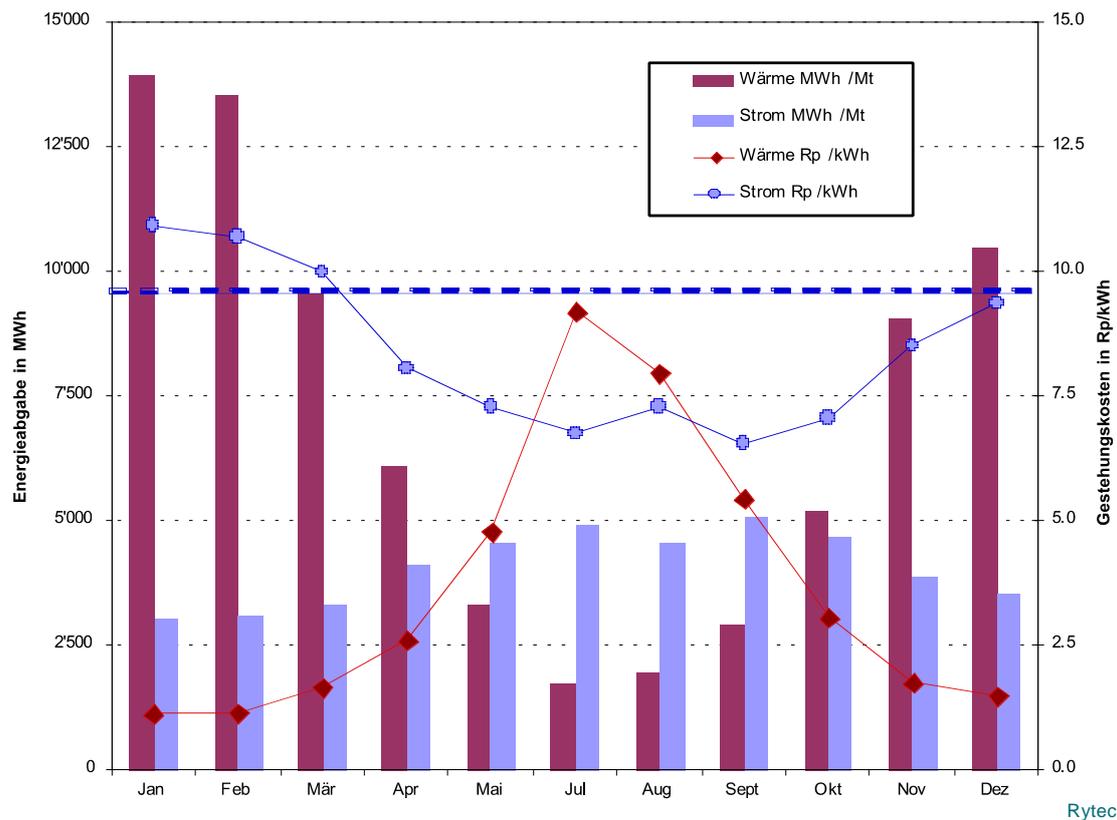


Thermische Stromproduktion in der Schweiz

Figur 13: Energieverbrauch sowie Eigenbedarf resp. Verkauf von selbstproduzierter Elektrizität und Wärme aller KVA in der Schweiz seit 1990 (Kaufmann 2012)

In der folgenden Grafik ist ein typischer Jahresverlauf der Wärme- und Stromproduktion einer KVA dargestellt.

«Typischer Jahresverlauf der Wärme- und Elektrizitätsproduktion einer KVA»



Figur 14: Beispiel eines Jahresgangs in der Energieproduktion einer KVA mit gleichzeitiger Fernwärmeabgabe und daraus resultierenden Veränderungen in den Gestehungskosten⁸. Referenzanlage «CH Standard» mit Entnahme-Kondensationsturbine. (Quelle: interner Bericht Bundesamt für Energie)

Potential für Regelleistung

Die KVA bieten grundsätzlich Potential für Regelleistung (kurzfristig abrufbare Produktionsmengen um die Netzstabilität sicherzustellen). Dieses Potential wurde sowohl für heute als auch für das zukünftige Energiesystem 2050 in einer Studie zum «Potential der Schweizer Infrastrukturanlagen zur Lastverschiebung» (Müller 2013) untersucht. Durch die Veränderung der Stromproduktion (kurzfristig eingesparter Dampf auf der Turbine bzw. verworfener Dampf durch anderweitige Wärmeabfuhr) und der internen Lasten können sowohl positive wie negative Regelleistung erzeugt werden.

Bei einer KVA machen die Prozesse der Verbrennung, Energieumwandlung und Rauchgasreinigung mit 77% den Hauptanteil des Stromverbrauchs aus. Sie sind jedoch voneinander abhängig und können nicht kurzfristig zu- oder abgeschaltet werden, da die primär zu erbringende Umweltleistung nur bei einem möglichst stabilen Betrieb gewährleistet werden kann. Die Möglichkeiten für Massnahmen im Verbrauch sind also eher klein. Bei der negativen Regelleistung wird der Dampf über einen Bypass gelenkt, anstatt ihn zur Stromproduktion zu nutzen. Sofern keine Speicherkapazität besteht oder die Anlage nicht in der Lage oder gewillt ist, den Abfalldurchsatz zu reduzieren, ist diese Massnah-

⁸ Der Juni fehlt in der Darstellung, da in diesem Monat i.d.R. Revisionen durchgeführt werden. Daher sind Aussagen zu Wärmenutzungsgrad, Kosten etc. nicht sinnvoll.

me zwar leistungsmässig wirkungsvoll (bis 6 MW pro Anlage), jedoch gesamtheitlich betrachtet energetisch nicht sinnvoll.

Das in der oben zitierten Studie angegebene Potential zur Lastverschiebung ist für die Schweizer KVA in Tabelle 4 dargestellt.

2012	
Lastverschiebung im Jahresmittel	
Positive Regelleistung während 1 Stunde	42 MW
Negative Regelleistung während 1 Stunde	148 MW
Saisonale Lastverschiebung Sommer-Winter	
Stromproduktion	210 GWh/a
Elektrische Leistung	50 - 60 MW

Tabelle 4: Potential zur Lastverschiebung der KVA (Müller 2013)

Betrachtet man die saisonalen Unterschiede, ist das Potential für Regelleistung im Winter etwas höher als im Sommer, da im Sommer Revisionen durchgeführt werden und in dieser Zeit die Stromproduktion geringer ist. KVA werden heute möglichst immer bei Volllast betrieben. Die Anlagen können aber auch im Sommer im Teillastbereich und im Winter bis zu 120% im Überlastbereich gefahren werden. Damit könnten die bestehenden KVA in der Schweiz heute theoretisch zusätzlich 210 GWh/a Strom im Winterhalbjahr produzieren (s. Tabelle 4). Die Potentiale könnten gesteigert werden, wenn für den Winterbetrieb zusätzliche Linien in Betrieb genommen werden können, redundante Gegendruckturbinen für den Winter installiert und zusätzliche Kapazität für die Abfalllagerung geschaffen werden.

Die Studie (Müller 2013) kommt zum Schluss, dass diese Verlagerung auf die Wintermonate jedoch mit grossem Koordinationsaufwand und hohen Kosten verbunden wäre. Im Rahmen der aktuellen Studie wird darüber hinausgehend untersucht, wie viele Anlagen mit der erforderlichen Art von Flexibilität in einem energie-optimierten System überhaupt noch vorhanden sind und entsprechend für Lastverschiebungen eingesetzt werden können. Differenzen in den Potentialschätzungen sind also durch die verfügbaren Abfallmengen und den anders gearteten Anlagepark zu erwarten.

2.3 Abfallwirtschaft 2035 – Szenario «Weiter wie bisher»

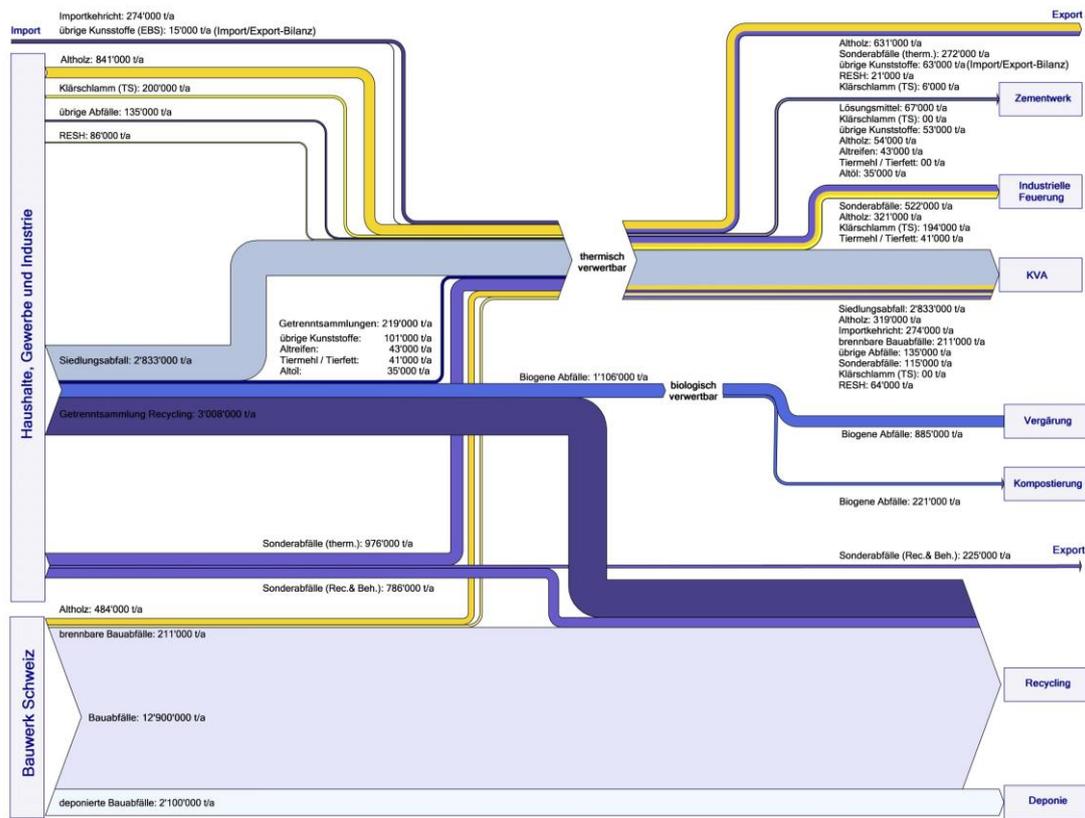
2.3.1 «Weiter wie bisher» – Ein Überblick

Als Referenz für die Szenarienarbeit dient die Hypothese über die wahrscheinliche Entwicklung der Schweizer Abfallwirtschaft ohne Systembrüche und einschneidende gesetzliche Vorgaben. Die Baseline «Weiter wie bisher» ist folgendermassen charakterisiert:

- Die Siedlungsabfallmenge und viele weitere Fraktionen nehmen mit dem BIP zu. Es wird von einer Wachstumsrate des realen BIP von durchschnittlich 0.9% (SECO 2011) ausgegangen. Dies ergibt bis 2035 eine Steigerung um 25% gegenüber 2012.
- Die Recyclingrate (inkl. Grüngut) nimmt bis 2035 um 9% auf 59% zu.

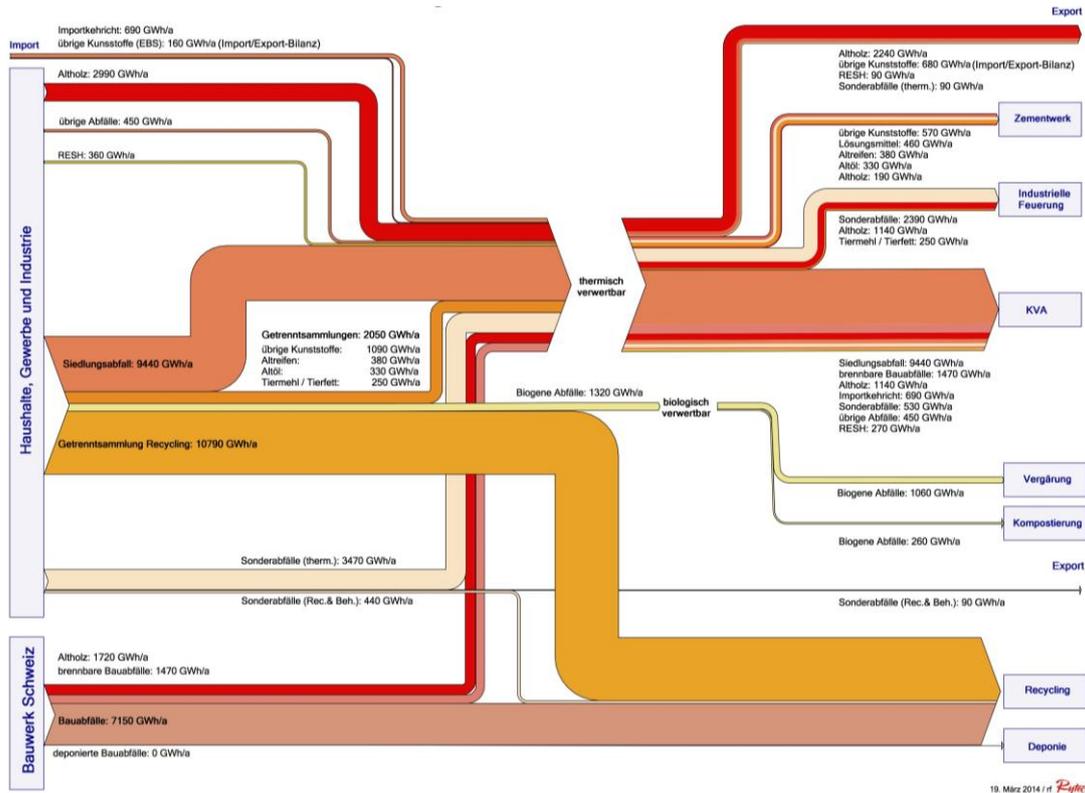
- Die Stoffströme verlaufen grundsätzlich wie im System 2012. Einzige Ausnahme: Klärschlamm und Tiermehl/-fette gehen in Spezialverbrennungsanlagen (vgl. Figur 1, «industrielle Heizkraftwerke» und «Zementwerke»).
- Die Abfallverwertungsanlagen bleiben grundsätzlich an den heutigen Standorten.
- Der Mix des KVA-Anlageparks verändert sich aufgrund der Effizianzorderungen geringfügig in Richtung Fernwärme- und Stromanlagen.
- Die Effizienz der energetischen Nutzung steigt moderat.

«Masseninhalte der Abfallströme 2035 – Weiter wie bisher»



Figur 15: Darstellung der Massenströme in der Schweizer Abfallwirtschaft in Tonnen pro Jahr. Ungelenkte Entwicklung «Weiter wie bisher». Eine vergrößerte Darstellung befindet sich im Anhang A-4.

«Energieinhalt der Abfallströme 2035 – Weiter wie bisher»



Ryttec

Figur 16: Darstellung der Energieströme in der Schweizer Abfallwirtschaft in GWh pro Jahr. Ungelenkte Entwicklung «Weiter wie bisher». Eine vergrösserte Darstellung befindet sich im Anhang A-5.

2.3.2 «Weiter wie bisher» – Die einzelnen Annahmen

Aufkommen Siedlungsabfall von Haushalten, Gewerbe und Industrie & Recycling

Die Siedlungsabfallmenge wächst mit dem BIP bis 2035 um 25%. Aktuell verläuft die Abfallmengenentwicklung parallel zum BIP und es wird bis 2035 kein Trendbruch angenommen. Die Prognose des jährlichen BIP-Wachstums beträgt zwischen 2015-2035 im Schnitt 0.9% und beinhaltet auch das Bevölkerungswachstum (SECO 2011, in Prognos 2012a verwendet). Letzteres wird gemäss dem mittleren Szenario des BFS prognostiziert, was einem Anstieg von rund 8.0 Mio. im Jahr 2012 auf rund 8.8 Mio. im Jahr 2035 entspricht (BFS 2010). Trends wie «Design for Recycling», Kreislaufwirtschaftsmodelle und eine genügsamere Lebensführung lassen eine leichte Entkopplung von BIP und Abfallentstehung bis 2035 erhoffen. Dies hier zu quantifizieren erachten wir als zu spekulativ.

Die Gesamtrecyclingrate (inkl. Grüngut) wächst bis 2035 um jährlich 0.4% auf 59%. Aktuell haben sich die Recyclingquoten der einzelnen Fraktionen mit Ausnahme von Grüngut auf hohem Niveau eingependelt (vgl. Anhang A-3). Swissrecycling erachtet in seiner «Vision 2030» eine Steigerung um jährlich 1% bis auf 65% als realistisch. Wir bewerten die Entwicklung für das Modell zurückhaltender.

Die Zusammensetzung des anfallenden Siedlungsabfalls und der Kehrichtsack-Restfraktion wird für die Modellbildung vereinfacht als konstant angenommen. Dies vernachlässigt Trends wie eine zunehmende digitale Informationsbeschaffung und dadurch potentiell sinkende Altpapiermengen, eine eventuell erfolgreiche Foodwaste-Kampagne und die Einführung einer Kunststoffhohlkörpersammlung.

Aufkommen der einzelnen Abfallfraktionen

Importkehricht: Wächst analog zum Siedlungsabfall mit dem BIP, da es sich vornehmlich um Siedlungsabfälle aus den Grenzregionen handelt.

Import übriger Kunststoffe (EBS): Bleibt auf bestehendem Niveau stabil. Obwohl der Energiebedarf der Zementindustrie um etwa 13% abnimmt, leiten wir daraus für diese Stofffraktion keine Konsequenz ab (vgl. Kapitel 3.1.1, Absatz Energienachfrage).

Altholz (Sperrgut, nicht Bauabfall): Die Altholzmenge aus Sperrgut ist an Produktion und Konsum gebunden und somit an das BIP gekoppelt.

Altholz (Bau) und thermisch nutzbare Bauabfälle: Das Volumen der Baubranche wächst bis im Jahr 2035 um knapp 25% (Ecoplan 2011). Dementsprechend verhalten sich auch die Bauabfälle.

Klärschlamm: Das Klärschlammaufkommen ist seit etwa 10 Jahren auf demselben Niveau stagniert. Es wird als gleichbleibend angenommen.

Übrige Abfälle: Das sind Industrie- und Gewerbeabfälle mit nicht siedlungsabfall-ähnlicher Zusammensetzung. Sie sind ans BIP gekoppelt.

RESH: Dies sind (nichtmetallische) Reststoffe aus Shredderwerken (Autos, Weissware, Elektroschrott u.a.). Diese wachsen mit dem BIP.

Biogene Abfälle: Aufgrund einer Studie für Kompogas erachten wir eine Steigerung der gesammelten Grüngutmenge um 30% als realistisch (Bachmann 2010).

Sonderabfälle: Da die Sonderabfälle in den letzten 10 Jahren um rund 5% stärker als das BIP zugenommen haben, wird dieser Trend fortgeschrieben.

Getrennsammlungen alternativer Brennstoffe: In der Schweiz werden übrige Kunststoffe, Altreifen, Tiermehl/-fett und Altöl für die Verwendung als alternative Brennstoffe v.a. für Zementwerke (und z.T. Export) getrennt gesammelt. Diese Fraktionen kommen aus der Produktion und sind grundsätzlich an das BIP gekoppelt. Die übrigen Kunststoffe und Lösungsmittel (analog Sonderabfälle) sind bis anhin 5% stärker als das BIP gewachsen. Es wird eine Fortsetzung dieses Trends angenommen.

Thermische Nutzung

Grundsätzlich werden die Stoffströme in die Zementwerke, in die industriellen Anlagen und in die KVAs nicht umgelenkt. Sie wachsen unter dem Einfluss der oben getroffenen Annahmen. Einzige Ausnahmen bilden:

Tiermehle und Tierfette: Diese werden mit der neuen TVA dem Primat der Nährstoffrückgewinnung unterworfen. Sie werden weg von den Zementwerken hin zu (teilweise) neuen Monoverbrennungsanlagen (Kategorie «industrielle Heizkraftwerke») umgelenkt, um die Phosphorrückgewinnung sicherstellen zu können.

Klärschlamm: Die Suche nach einer wirtschaftlichen Lösung zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm ist noch nicht abgeschlossen. Erste Kantone setzen bereits auf Monoverbrennungsanlagen. Im Modell wird von einer schweizweiten Monoverbrennungslösung ausgegangen. Der Klärschlamm wird somit ebenfalls weg von den Zementwerken hin zu Monoverbrennungsanlagen (Kategorie «industrielle Heizkraftwerke») umgelenkt.

Biologische Verwertung

Vergärung / Kompostierung: Hier wird von einer weiteren Zunahme der Vergärung bis zu einem Verhältnis 80% Vergärung zu 20% Kompostierung ausgegangen. Da die Vergärung meist einer Nachkompostierung bedarf, wird die Anzahl Anlagen nicht zwingend abnehmen.

Abfallexporte

Die Abfallexporte von Altholz, Sonderabfällen und übrigen Kunststoffen wachsen analog zu ihrem gestiegenen Anfall. Es wird keine Umlenkung angenommen.

Die RESH-Exporte bleiben bei steigendem RESH-Anfall in etwa stabil. Dies entspricht dem aktuellen Trend (Daten Stiftung Auto Recycling Schweiz), dass jährlich immer mehr RESH in der Schweiz in KVAs energetisch genutzt wird. Annahme für 2035 sind 75% Verwertung in der Schweiz.

Die Klärschlamm-Exporte bleiben auf dem Niveau von 2012. Hierbei handelt es sich um Klärschlamm aus Grenzregionen. Dieser Strom bleibt bestehen und die Klärschlamm-mengen sind in der Schweiz konstant.

Anlagen zur energetischen Nutzung

Zementwerke: Trotz einer Zunahme (mit dem BIP) der Menge an alternativen Brennstoffen reduziert der Wegfall von Klärschlamm und Tiermehl/-fett die Gesamttonnage um 12%. Der Energieinput nimmt jedoch um gut 6% zu, weil der wegfallende Klärschlamm im Modell energetisch neutral gerechnet wird (Nettobetrachtung: Die zur Klärschlamm-trocknung aufgewendete Energie wird bilanziell beim Zementwerk in Abzug gebracht).

Der Nettoenergiebedarf der Schweizer Zementindustrie sinkt bis 2035 um 13%. Die Zunahme der Zementproduktion um 25% (direkte Folge des Baubranchenwachstums um 25%, Ecoplan 2011) wird – dank fortgeschriebenem Trend der Klinkersubstitution – von einem um 30% gesunkenen Brennstoffbedarf pro Tonne Zement überkompensiert. Der Anteil alternativer Brennstoffe aus Abfall steigt auf 60% gegenüber 49% im Jahr 2012.

Es wird zudem von einer Steigerung des thermischen Nutzungsgrades um 10% auf 70% ausgegangen. Auch werden erste Niedertemperaturnutzungen und die Stromproduktion aus den Abgasen (ORC-Anlagen) die Energieeffizienz weiter verbessern.

Industrielle Heizkraftwerke: Durch Mengensteigerungen und zusätzliches Tiermehl/-fett und Klärschlamm (nicht energierelevant) erhält diese Anlagengruppe gut 40% mehr Abfälle. Der Anlagenpark wächst dabei in den Bereichen Sonderabfallverbrennung, Altholz-

feuerungen für FW-Netze und Feuerungen für industriellen Prozesswärmebedarf organisch weiter. Stärker als der Trend werden die Monoverbrennungen für Klärschlamm und Tiermehl/-fette wachsen. In allen Bereichen steigt der Prozessdampfwirkungsgrad moderat um 5% und die Stromnutzung nimmt auch etwas zu.

Kehrichtverbrennungsanlagen: Die Abfallmenge, die in KVA verbrannt wird, steigt lediglich um 200'000 Jahrestonnen oder gut 5%. Der RESH-Anteil nimmt zu, der Klärschlamm fällt weg und der Siedlungsabfall wächst wegen dem gesteigerten Recycling langsamer als das BIP. Der Anlagenpark bewegt sich leicht in Richtung von Stromproduktions-KVA. Der energetische Wirkungsgrad der Anlagen steigt um 5-10%.

2.4 Folgerungen und Bemerkungen zum Szenario «Weiter wie bisher»

2.4.1 Allgemeine Folgerungen

Der Verbrauch von Wärme und Strom in der Schweiz unterliegt starken jahreszeitlichen Schwankungen und ist im Winter deutlich grösser als im Sommer. Bei der Elektrizität variiert zudem auch die Produktion während des Jahres beträchtlich. Sie übersteigt den Verbrauch im Sommer heute markant; in einigen Wintermonaten hingegen ist der Verbrauch höher als die inländische Erzeugung. Des Weiteren kommen sowohl bei der Wärme wie auch bei der Elektrizität eine ausgeprägte tageszeitliche Schwankung hinzu.

Diese Schwankung zwischen Sommer und Winter wird auch für die Entwicklung der Elektrizitätsproduktion aus erneuerbaren Energien und des Verbrauchs bis im Jahr 2035 erwartet. Aufgrund des zukünftig höheren Anteils von neuen erneuerbaren Energien (hauptsächlich Photovoltaik und Wind) wird einerseits die Differenz zwischen der erneuerbaren Stromproduktion im Sommer und Winter erhöht. Andererseits werden auch die kurzfristigen Schwankungen in der Produktion verstärkt. Aus heutiger Sicht ist jedoch noch unklar, ob die fehlenden Elektrizitätsmengen, insbesondere im Winter, hauptsächlich durch Importe oder durch den Zubau von fossilen Kraftwerken im Inland (GuD und WKK) gedeckt werden. In jedem Fall würde jedoch eine verstärkte Stromproduktion aus der Abfallverwertung zur Substitution fossiler Energieträger führen.

Beim Wärmeverbrauch liegt eine noch stärkere jahreszeitliche Schwankung vor, da Raumwärme primär im Winterhalbjahr bezogen wird. Genaue Zahlen zum Anteil inländischer Energieträger zur Wärmeerzeugung liegen nicht vor. Ein grosser Teil des Wärmebedarfs wird jedoch mit fossilen Energieträgern gedeckt. Daher ist klar, dass Importe einen wesentlichen Beitrag zur Deckung der Wärmenachfrage leisten. Zu beachten ist, dass der jahreszeitliche Anfall der Siedlungsabfälle und des Grüngutes ebenfalls schwankt und im Winter – wenn die Nachfrage bzw. der Nachfrageüberhang nach Wärme und Strom am höchsten wäre – die kleineren Mengen als im Sommer anfallen.

Prozesswärme wird über das ganze Jahr mehr oder weniger konstant bezogen. Im Hinblick auf die Produktionsstandorte sowie die erzeugte Menge von Fernwärme aus Abfällen ist interessant, welche Betriebe und Industriezweige einen hohen thermischen Wär-

mebedarf aufweisen. In der Zementindustrie haben die einzelnen Anlagen durchschnittlich einen sehr hohen Energiebedarf. Aufgrund des geforderten Temperaturniveaus können diese Betriebe nicht mit Abwärme versorgt werden. Sie sind daher eher als alternative Verwertungsmöglichkeit für brennbare Abfälle relevant. Die darauffolgenden Industriezweige mit einem hohen Wärmebedarf pro Betrieb sind die Metall- und Eisenindustrie sowie die Chemie- und Pharmaindustrie. Gesamthaft betrachtet weist die Chemie und Pharmabranche den höchsten Verbrauch auf.

Der Prozesswärmebedarf, welcher während dem Jahr etwa konstant ist, beträgt heute rund 18'000 GWh/a. Die gesamte Wärmeproduktion der Abfallwirtschaft (inkl. industrielle Heizkraftwerke und Zementwerke) erreicht heute knapp 6'000 GWh pro Jahr. Es stellt sich daher die Frage, um wie viel die Wärmeversorgung mit Energie aus der Abfallverwertung erhöht werden kann. Die Versorgung mit Prozess- und Fernwärme aus KVA und industriellen Heizkraftwerken ist durch die Standortgebundenheit begrenzt.

2.4.2 Erkenntnisse aus dem Szenario «Weiter wie bisher»

Vor dem Hintergrund der zukünftig rückgängigen Energienachfrage und einer wirtschaftsabhängigen Abfallmengen Zunahme kann die Abfallenergie grössere Anteile der Gesamtwärmenachfrage decken. Es ist absehbar, dass (mengenmässig) die Versorgung der Fernwärmenetze und ein grosser Teil des industriell benötigten Prozessdampfes aus Abfällen sichergestellt werden kann, auch wenn zuvor der Bedarf der Zementwerke mit signifikanten Mehrmengen gedeckt wird.

Die Zunahme der Stromproduktion bleibt in diesem Szenario unter den Möglichkeiten, weil nur mit minimalen Effizienzsteigerungsmassnahmen gerechnet wurde.

2.4.3 Diskussion der Sensitivität des Szenarios «Weiter wie bisher»

Die Abfallmengen im Mengenmodell reagieren durch die direkte Kopplung ans BIP sehr stark auf die Annahmen zum Wirtschaftswachstum. Alternativ zur SECO-Prognose (durchschnittlich +0.9% pro Jahr) wurde auch die Prognose des BAK-Basel mit durchschnittlich jährlich 1.7% Wachstum getestet. Dieser scheinbar kleine Unterschied führt kumulativ zu einem doppelt so grossen Wirtschafts- und Abfallmengenwachstum (+50% anstatt +25%). In diesem Fall würde das Mengenwachstum den gesamten durch Abfall bereitstellbaren Dampf- und Wärmebedarf auch ohne Stoffstromlenkung decken. Überschussmengen können allesamt verstromt werden. Die weiteren Berechnungen stützen sich jedoch auf die SECO-Prognose (SECO 2011), um mit den Wärme- und Energieprognosen (Prognos 2012a) konsistent zu sein, die sich ebenfalls darauf beziehen.

3 Zukünftige Rahmenbedingungen und strategische Optionen für die Transformation der Abfallwirtschaft

Im nachfolgenden Kapitel 4 wird ein Katalog von technischen Handlungsoptionen für die Transformation der Abfallverwertung entwickelt, aus welchem in einem nächsten Schritt eine Auswahl für die Umsetzung getroffen werden muss. Bei dieser Wahl stellt sich die Hauptfrage, ob für die optimierte Energienutzung aus der Abfallverwertung eine einzelne Stossrichtung ausgewählt werden soll (Optimierung bezüglich Wärme, Strom, kurzfristiger Leistung oder saisonalem Ausgleich). Oder sollen im Gegensatz zu einer Hauptstossrichtung verschiedene Handlungsoptionen als Einzelmassnahmen umgesetzt werden, ohne dabei einen einzelnen Fokus für die zukünftige Abfallverwertung festzulegen?

Für die Beantwortung dieser Fragestellung werden zuerst die zukünftigen Rahmenbedingungen und Entwicklungstrends, welche den Handlungsspielraum und Handlungsbedarf für die Transformation der Abfallverwertung festlegen, beschrieben. Daraus können die strategischen Optionen abgeleitet werden, anhand welcher eine zeitliche und energetische Optimierung umgesetzt werden kann.

3.1 Zukünftige Rahmenbedingungen

Die zukünftigen Rahmenbedingungen beschreiben, inwiefern der Handlungsspielraum zur Anpassung der Abfallverwertung eingeschränkt wird bzw. auf welche Voraussetzungen sich diese bis im Jahr 2035 abstützen kann.

3.1.1 Marktumfeld Energie im Jahr 2035

Energienachfrage:

Basierend auf den verwendeten Szenarien wird der gesamte Wärmeverbrauch⁹ bis im Jahr 2035 um 26% abnehmen. Der Verbrauch von Raum- und Prozesswärme nimmt um 30% bzw. 20% ab, der Warmwasserverbrauch sinkt um 11% (Prognos 2012a) (vgl. Kap. 2.2.2). Der Raumwärmebedarf von Gebäuden wird im Jahr 2035 verstärkt von der Gebäudesubstanz und der Struktur des Siedlungsgebiets abhängen. Dank energetischer Sanierungen in Wohngebieten mit relativ neuer Bausubstanz wird der Wärmebedarf in diesen Gebieten drastisch sinken. In Gebieten mit hohem Anteil älterer Bausubstanz (v.a. im innerstädtischen Raum) wird der Effekt von Sanierungen geringer sein und die Deckung des Wärmebedarfs über Wärmenetze bleibt auch zukünftig eine attraktive Option.

⁹ Raum-/Prozesswärme/Warmwasser, ohne elektrische Produktion

Heute nutzen laut Fernwärmestatistik¹⁰ die grossen Fernwärmenetze, welche an KVA angeschlossen sind, rund 2'000 GWh Wärmeenergie aus Abfällen. Es wird davon ausgegangen, dass bei den bestehenden Fernwärmenetzen je nach Standort ein Ausbaupotential durch Netzverdichtungen besteht. Dieses beträgt für ländliche Gebiete 20%, für städtische Gebiete 50% und für sich im Aufbau befindende Fernwärmenetze 100%. Zusätzlich wird aber auch mit einem Rückgang des Raumwärmebedarfs bis 2035 von 30% gerechnet (Prognos 2012a). Aufgrund dieser Annahmen wird ein Potential für die Fernwärmeversorgung aus Abfallenergie im Jahr 2035 abgeschätzt. Darin enthalten sind die heute bestehenden, grossen Fernwärmenetze, die bereits Energie aus Abfall nutzen sowie Wärmenetze, deren Energieträger zukünftig durch Abfall substituiert werden könnte (Abwärme aus KKW oder Erdgas). Des Weiteren wird angenommen, dass die Netze mindestens 300 GWh gross sein müssen im Fall von Bandlast-Fernwärmeanlagen (KVA Typ 2) bzw. 100 GWh im Fall von KVA des Typs saisonale Fernwärme-Anlagen (KVA Typ 3a, zu den Anlagentypen s. Kap. 6.2). Werden die genannten Annahmen zusammengefasst, resultiert ein Potential für die Fernwärmeversorgung aus der Abfallverwertung von rund 2'400 GWh im Jahr 2035. Dieses Potential verteilt sich mit rund 1'800 GWh auf Bandanlagen des Typs «Fernwärme-KVA in Bandlast» bzw. mit rund 600 GWh auf Anlagen des Typs «saisonale Fernwärme-KVA».

	Anteil Fernwärme aus Abfällen (GWh)
Fernwärme aus der Abfallverwertung heute	2'000
Potential Fernwärme aus der Abfallverwertung 2035	2'400
davon Anteil in «Fernwärme-KVA in Bandlast (Typ 2) »	1'800
davon Anteil in «Fernwärme-KVA, saisonale Betriebsweise (Typ 3a)»	600

Tabelle 5: Abschätzung der Fernwärmeversorgung mit Energie aus der Abfallverwertung heute und 2035

Die Nachfrage nach Prozesswärme ist branchenabhängig (vgl. Kap. 2.2.2). Die Zementindustrie mit dem gesamthaft höchsten thermischen Energiebedarf kann Abfälle nur als direkte Brennstoffe verwerten. Ihr Nettoenergiebedarf sinkt bis 2035 um 13% (vgl. Kap. 2.3.2). In den letzten 10 Jahren wurde der Brennstoffbedarf hierdurch um 10% gesenkt. Die weitere Reduktion bis 2035 ist eine Fortführung des Trends und auf einen verstärkten Anreiz durch eine verschärfte CO₂-Gesetzgebung ab 2021 zurück zu führen. Der maximale Beitrag von Abfall am Brennstoffbedarf wird auf gegen 80% geschätzt (basierend auf Gesprächen mit Experten). Der Rest teilt sich auf in Strombedarf für das Mahlen ca. 8% (heute 11%), andere alternative Brennstoffe ca. 6% (heute 9%) und ein Restbedarf an fossilen Brennstoffen für Prozessstabilität ca. 6%.

Weitere Industrien mit hohem Prozesswärmeverbrauch sind die Chemie-/Pharma-, Nahrungsmittel-, Papier-/Zellstoff- sowie die Metall-/Eisenindustrie. Diese können ihren Bedarf über Wärmenetze (Heisswasser, allenfalls Dampf) decken; die Energienutzung ist dabei jedoch standortgebunden. Eine Prognose der zukünftigen Zusammensetzung des

¹⁰ Quelle: Verband Fernwärme Schweiz: <http://www.fernwaerme-schweiz.ch/fernwaerme-deutsch/Verband/Jahresstatistik>

Industrieparks ist schwierig. Es ist denkbar, dass tendenziell traditionelle Industriezweige wegfallen und dafür der Anteil von innovativen High Tech-Betrieben zunehmen wird.

Die Prozesswärmenachfrage wurde für das Jahr 2035 ebenfalls quantitativ abgeschätzt. Der gesamte Prozesswärmebedarf beträgt 2035 gemäss den Energieperspektiven rund 19'000 GWh (Endenergie, Prognos 2012a). Davon fallen etwa 2'200 GWh auf die Zementwerke, unter den oben genannten Annahmen. Vom gesamten Prozesswärmebedarf der Zementwerke können schätzungsweise rund 1'800 GWh durch Abfälle gedeckt werden. Für die Aufteilung zwischen Prozessdampf- und Prozesswärmebedarf der übrigen Industrien wurde ein Verhältnis von 2/3 zu 1/3 angenommen. Dieses wurde basierend auf einer Abschätzung der heutigen Verteilung für die 40 grössten Energieverbraucher (gemäss nationalem Emissionshandelsregister, siehe auch Anhang A-9) ermittelt. Schliesslich haben wir angenommen, dass etwa 30% des Prozessdampf- bzw. Prozesswärmebedarfs durch Energie aus Abfällen gedeckt werden kann. Dies berücksichtigt, dass nur Unternehmen ab einem Leistungsbedarf von 1-2 MW_{th} überhaupt die Grösse für eine eigene «Abfallfeuerung» haben, nicht alle Unternehmen an einem Fernwärmenetz angeschlossen werden können und nur bis zu einem gewissen Grad Industriecluster entstehen werden. Die Deckung von 30% des Prozessenergiebedarfs aus der Abfallverwertung entspricht etwa einem Anlagenpark von gut 30 industriellen Heizkraftwerken, 3-4 KVA für Prozesswärmeproduktion und 11 KVA in jeweils einem Fernwärmenetz unter der Annahme, dass sich pro Anlage 1-4 Betriebe anschliessen lassen (vgl. auch Kap.6.1).

	GWh
Total Prozesswärmebedarf 2035 gemäss Energieperspektiven	18'900
davon Zementwerke	2'200
Deckung Prozesswärme durch Energie aus Abfall	1'800
davon übrige Industrien	16'700
davon Prozessdampf (2/3)	11'100
Deckung Prozessdampf durch Energie aus Abfall (30%)	3'700
davon Prozesswärme (1/3)	5'600
Deckung Prozesswärme durch Energie aus Abfall (30%)	1'900

Tabelle 6: Abschätzung des industriellen Wärmeenergiebedarfs 2035 (Endenergie)¹¹

Energiepreise:

Die Entwicklung der Schweizer Energiepreise sowie des CO₂-Preises im internationalen Emissionshandelssystem (Emission Trading System, ETS) wurde in (Prognos 2012a) abgeschätzt und ist in Tabelle 7 abgebildet. Die Preisanstiege sind teilweise auf den Anstieg der CO₂-Abgabe bzw. des ab 2020 internationalen CO₂-Preises zurückzuführen. Der Anstieg des Strompreises ist unter anderem durch den grösser werdenden Anteil an Technologien mit höheren Gestehungskosten (neue Erneuerbare) bedingt.

¹¹ Quellen: Cemsuisse Jahresbericht 2012; Nationales Emissionshandelsregister, Allokationsplan Periode 2008-2012

Energieträger	Einheit	Ausgangswert Verbraucherpreise	lineare Preissteige- rung pro Jahr	Prognosewert Verbraucherpreise	Veränderung in %
		2013		2035	
Heizöl leicht	Rp./kWh	9.6	1.6%	13.1	+44%
Erdgas	Rp./kWh	9.0	2.2%	13.6	+51%
Elektrizität*	Rp./kWh	23.4	1.4%	30.9	+32%
Fernwärme**	Rp./kWh	7.4	1.3%	9.6	+30%
CO ₂ -Preis (ETS)	US\$/t CO ₂	15.0	20.0%	85.0	+467%

Tabelle 7: Entwicklung der Schweizer Verbraucherpreise für Energie (in realen Preisen von 2013) sowie der internationalen CO₂-Preise gemäss ETS (Prognos 2012a und econcept 2014¹²)

* CH-Verbrauchermix, Endverbraucherpreise inkl. Netznutzung

** Durchschnitt Netze CH, mit Nutzung von Kehrriehwärme

Die Preisentwicklung von Energieholz wurde in (econcept 2013) abgeschätzt. Ausgangspreise im Jahr 2012 sind 5 Rp./kWh für Holzschnitzel bzw. 8 Rp./kWh für Pellets. Es wird angenommen, dass die Preise bis im Jahr 2035 auf rund 8 Rp./kWh respektive 11 Rp./kWh ansteigen.

Aufgrund der dargelegten Abschätzungen ist davon auszugehen, dass die Preise für thermische Energie stärker steigen werden als für Elektrizität (s. Tabelle 7). Zudem ist anzunehmen, dass die Nachfrage nach saisonaler Verfügbarkeit zu einer Zunahme des Strompreises im Winter führen wird.

Auf Grund der vermehrten Elektrizitätsproduktion aus stochastisch vorhandenen erneuerbaren Energien wird die Volatilität der Elektrizitätspreise zunehmen und damit einhergehend der Stellenwert von Regelenergie. Kehrriehverbrennungsanlagen sind heute bereits in der Lage, tertiäre Regelenergie bereitzustellen. Wir gehen davon aus, dass die Teilnahme der KVA an Tertiärregelsystemen Mehrerträge generiert, die jedoch deutlich geringer sind als die Erträge durch den produzierten Strom.

Bei steigenden Energiepreisen lohnen sich Abwärmennutzungs- und Effizienzoptimierungsmassnahmen vermehrt und der Anreiz steigt, die Abfallverwertung als energetische Nutzung zu betrachten. Für die Nutzung von KVA-Abwärme wird zudem relevant sein, welche Kompensationsleistungen für Treibhausgasemissionen den Anlagebetreibern auferlegt werden.

Energiesystem

Die vermehrte dezentrale Elektrizitätsproduktion wird zu relevanten Veränderungen der Netzinfrastruktur führen. Dabei werden dezentrale Speichermöglichkeiten und die Verbindung des Elektrizitätsnetzes mit Kommunikationstechnologien (Smart Grid) auch eine verstärkte tageszeitliche Steuerung der Nachfrage zulassen.

Im Rahmen der Energiestrategie 2050 wurden die Hauptherausforderungen für die Stromübertragung und -verteilung identifiziert und Massnahmen vorgeschlagen (BFE 2012).

¹² Daten beziehen sich auf eine noch laufende Studie; diese wird demnächst abgeschlossen und publiziert.

Diese umfassen das Erarbeiten einer «Strategie Energienetze», die Beschleunigung der Genehmigungsverfahren, die Nutzung von Smart Metering und den Umbau der Netze Richtung Smart Grids, Netzverstärkungen für neue Produktionsanlagen sowie die Abstimmung des Netzausbaus mit Europa. Es ist davon auszugehen, dass die Umsetzung der verschiedenen Massnahmen bis im Jahr 2035 einen unterschiedlichen Stand erreicht haben und nicht abgeschlossen sein wird. Es sind keine massgeblichen Auswirkungen auf die Abfallwirtschaft zu erwarten.

Die Wärmeversorgungssysteme werden vielfältiger, da auch die Wärmenachfrage eine grössere Variabilität betreffend Temperaturniveau aufweisen wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass die bestehenden Wärmenetze weiterbetrieben werden. Neue Wärmenetze werden – falls sie nicht Prozesswärme liefern – auf tieferen Temperaturniveaus, allenfalls kombiniert mit dezentraler zusätzlicher Erwärmung, betrieben werden. Es werden vermehrt dezentrale Wärmequellen genutzt, beispielsweise aus der zunehmenden Kälteproduktion. Diese Voraussetzungen lassen eine verstärkte Elektrizitätsproduktion bei thermischen Abfallverwertungsanlagen zu, da der Dampf in der Turbine bis zu einem tieferen Temperaturniveau entspannt werden kann.

3.1.2 Politische Vorgaben

Die grössten Veränderungen von regulatorischen Vorgaben mit Einfluss auf die Abfallverwertung sind als Folge der Revision der TVA (gemäss BAFU 2011) zu erwarten. Zudem beeinflussen Vorgaben aus der Umsetzung der Energiestrategie die Abfallwirtschaft.

Zuständigkeiten in der Abfallentsorgung

Die Abfallentsorgung ist heute eine kommunale Aufgabe und wird dies in der näheren Zukunft voraussichtlich auch bleiben, obwohl politisch heute unterschiedliche Zielsetzungen verfolgt werden. Einerseits fordert die «Motion Schmid», das Transport- und Entsorgungsmonopol des Gemeinwesens für Gewerbebehricht grösserer Betriebe aufzuheben, was dazu führen würde, dass sämtliche Abfälle aus Industrie-, Gewerbe-, Dienstleistungs- und Verwaltungsbetrieben nicht mehr als Siedlungsabfälle gelten und damit nicht mehr dem Entsorgungsmonopol des Staates unterstehen würden (BAFU 2011). Andererseits strebt die «Motion Fluri» das gegenteilige Ziel an, nämlich die Entsorgung von Gewerbebehricht von kleinen und mittleren Betrieben beim Staat zu belassen. Aus heutiger Sicht ist also ein Trend in Richtung «business as usual» bezüglich des Angebots von Entsorgungsleistungen zu erwarten.

Die Planung der Abfallentsorgung erfolgt auf kantonaler Ebene mit dem Instrument der kantonalen Abfallplanungen. Die Umsetzung einer grossräumigeren, kantonsübergreifenden Planung erfordert jedoch zusätzliche Gremien zur Koordination von Massnahmen.

Effizienzvorgaben

Die neue TVA wird vorgeben, dass Abfallanlagen bei der Entsorgung der Abfälle deren Energiegehalt möglichst effizient nutzen müssen. Mit einer entsprechenden Anpassung sollen verbindliche Vorgaben für die optimierte Energienutzung der KVA und anderen thermischen Abfallanlagen festgelegt werden. Dabei sollen neue Anlagen oder Anlagen,

die massgeblich erneuert oder erweitert werden, einen minimalen gesamtenergetischen Wirkungsgrad aufweisen müssen (BAFU 2011).

Vorgaben zur Abfallverwertung

Für Anlagen, die biogene Abfälle behandeln, sollen umwelttechnische Anforderungen definiert werden, insbesondere bezüglich Schadstoffe, Standorte, dem Betrieb nach dem Stand der Technik und der behördlichen Kontrolle. Zudem sollen Anforderungen an die stoffliche und/oder energetische Nutzung von biogenen Abfällen festgelegt werden.

Es ist damit zu rechnen, dass auch die Zementwerke auf eine vermehrte Flexibilität für die Annahme unterschiedlicher Brennstofftypen hinarbeiten werden, um Einbussen in gewissen Kategorien (Tiermehl, Klärschlamm) kompensieren zu können. Abfälle dürfen bei der Herstellung von Zement und Beton verwendet werden, sofern sie zu bestimmten Abfallkategorien gehören oder bestimmte Grenzwerte einhalten. Die Entsorgung soll aber wie bei den Siedlungsabfällen ausschliesslich in der Schweiz stattfinden und Exporte sollen grundsätzlich nicht bewilligt werden. Dies bedeutet, dass die durch die Zementindustrie zusätzlich genutzten Abfallmengen für eine saisonale Lagerung nicht zur Verfügung stehen werden (BAFU 2011).

Nach einer Übergangsfrist soll der Phosphor in phosphorreichen Abfällen wie Klärschlamm, Tier- und Knochenmehl nach dem Stand der Technik zurückgewonnen werden. Die Behandlung des Klärschlammes erfolgt nährstoffgetrieben und ist nicht energetisch relevant.

Neu soll auch für Kunststofffolien aus Industrie-, Gewerbe-, Dienstleistungs- und Landwirtschaftsbetrieben in der ganzen Schweiz eine stoffliche Verwertung vorgesehen werden.

Raumplanung

Über Vorgaben für die Standorte der Verwertungsanlagen bzw. für die Energiebezüger kann die Raumplanung die Nutzung der Wärmeenergie aus der Abfallverwertung steuern.

Die kantonale Energiedirektorenkonferenz will in eigener Kompetenz als Massnahme umsetzen, dass bis im Jahr 2015 die erschliessbaren Potentiale an erneuerbaren Energien in den kantonalen Richtplänen festgelegt werden sollen. Bestehende und neu notwendige Energieversorgungsnetze (u.a. Fernwärme) sollen mit anderen räumlichen Interessen abgestimmt werden (EnDK 2011).

Es ist denkbar, dass bis im Jahr 2035 um die Standorte von KVA Zonen ausgeschieden werden, in denen eine Verpflichtung zur Abwärmenutzung festgeschrieben ist. Die Ansiedlung von energieintensiven Industriebetrieben innerhalb solcher Zonen wird damit gefördert.

Aus diesen Rahmenbedingungen können Vorgaben für einzelnen Abfallanlagen resultieren. Sie schränken aber den Handlungsspielraum für eine zeitlich und energetisch optimierte Energienutzung nicht ein sondern fördern die Optimierung in verschiedenen Dimensionen.

Schadstoffemissionen

CO₂-Gesetz und Umweltschutzgesetz bilden den Rahmen für die Beschränkung der Schadstoffemissionen in der Schweiz. Für die Ermittlung des Handlungsspielraumes gehen wir davon aus, dass die bisherige Stossrichtung zur Minimierung der Umweltauswirkungen beibehalten wird. Die Festlegung von zusätzlichen Grenzwerten konzentriert sich auf neu als problematisch erkannte Emissionen. Bereits bestehende und wirksame Grenzwerte werden nicht laufend (nach den technischen Möglichkeiten) angepasst.

Reduktionsziele CO₂

Die Klimapolitik der Schweiz berücksichtigt die Emissionen aller Treibhausgase (d.h. neben CO₂ auch CH₄ und N₂O). Bei den CO₂-Emissionen konzentrieren sich die Anstrengungen auf fossile Energieträger und geogene Emissionen aus Prozessen. Zurzeit wird eine Zielvereinbarung zwischen dem Bund und den KVA erarbeitet. Es soll ein verbindliches Reduktionsziel vereinbart werden; allerdings ist der Steuerungsmechanismus noch nicht abschliessend festgelegt. Es ist zu hoffen, dass das CO₂-Gesetz nicht zu einer Verteuerung der Energieproduktion in KVA führen wird, was einen kleinen Vorteil für Abfallanlagen bedeutet. Es ist in diesem Zusammenhang zu beachten, dass bereits 2017 die Revision des CO₂-Gesetzes beginnen wird und eventuell zukünftig weitere klimarelevante Emissionen (ausser CO₂) aus der Abfallverwertung relevant sein werden.

3.2 Strategische Optionen

Basierend auf den dargelegten Rahmenbedingungen und Entwicklungstrends können verschiedene strategische Optionen untersucht werden, welche die Ausrichtung der Transformation beschreiben und die Umsetzung der technischen Handlungsoptionen steuern. Es stellt sich dabei die Frage, welchen Beitrag eine Anpassung der Abfallwirtschaft zu einer optimierten Energiebereitstellung leisten kann und welche Anforderungen dabei an die Energienutzung gestellt werden. Basierend auf den vorgängigen Analysen können die folgenden drei Hauptausrichtungen als mögliche Optionen identifiziert werden:

- a) Wärmeproduktion, insbesondere Substitution fossiler Prozesswärmeerzeuger bei Industrien

Ausrichtung: Diese Option legt den Fokus auf die Priorisierung und Intensivierung der Wärmeproduktion aus Abfällen, insbesondere auf die Nutzung der thermischen Energie aus der Verbrennung der Abfallfraktionen sowohl in KVA als auch in andern geeigneten Anlagen. Die Wärmeenergie wird hauptsächlich in Prozess- und Fernwärmenetze eingespeist; Abfälle können aber auch direkt als Ersatzbrennstoffe zur Substitution fossiler Ressourcen in industriellen Prozessen eingesetzt werden. Wärmenetze versorgen sowohl den Gebäudepark mit Energie für Raumwärme und Warmwasser als auch Industriebetriebe mit Prozesswärme (wo dies aufgrund der erforderlichen Temperaturniveaus möglich ist). Da im Gebäudebereich der Wärmebedarf zukünftig tendenziell sinken wird,

soll der Fokus insbesondere auf der Substitution fossiler Prozesswärmeerzeuger bei Industrien liegen. Die Elektrizitätsproduktion (Menge und Regelenergie) erfolgt subsidiär.

Anforderungen: Prozesswärme und Warmwasser müssen über das ganze Jahr bereitgestellt werden; der Raumwärmebedarf ist auf das Winterhalbjahr beschränkt. Die Fernwärmeversorgung ist standortgebunden; daher sind raumplanerische Regulierungsmassnahmen relevant. Die Standortgebundenheit bedingt eine dezentralere Energieerzeugung; d.h. zahlreichere kleinere Anlagen, die auf die Abnehmer ausgerichtet sind. Die Temperaturniveaus der Versorgung müssen auf die Endkunden ausgerichtet sein. Dies erlaubt aber auch eine stärkere Diversifizierung und höhere Elektrizitätsproduktion und somit optimierte Energieausnutzung, sofern genügend Abnehmer mit Anwendungen auf tiefen Temperaturniveaus bestehen.

b) Stromproduktion zu Zeiten höherer Elektrizitätsnachfrage als -produktion

Ausrichtung: Diese Option legt den Fokus auf die Priorisierung und Intensivierung der Stromproduktion zu Zeiten einer höheren Stromnachfrage im Vergleich zur inländischen Produktion. Die Energienutzung aus Abfällen priorisiert die Stromproduktion; die Nutzung der Wärmeenergie ist dabei sekundär. Dies bedeutet, dass eher grosse, zentrale Anlagen mit hohen Kapazitäten im Vordergrund stehen.

Anforderungen: Die Stromnachfrage übersteigt das inländische Angebot erneuerbarer Energien im Winterhalbjahr; die Produktion ist also darauf auszurichten. Deshalb ist die Lagerung von Abfällen im Jahresverlauf in Betracht zu ziehen. Um die Stromproduktion im Winter zu maximieren sind für die Nutzung der Wärmeenergie als «Nebenprodukt» insbesondere Anwendungen auf tiefen Temperaturniveaus interessant. Da diese Abnehmer in der Regel kontinuierlich während dem ganzen Jahr versorgt werden müssen, könnten Wärmespeicher zur besseren Regulierbarkeit genutzt werden. Die Anlagen wären also so auszurichten, dass sie im Winter mit höherer Auslastung als im Sommer betrieben werden können.

c) Flexibilisierung der Stromproduktion im Tagesverlauf

Ausrichtung: Flexibilisierung der Stromproduktion im Tagesverlauf. Die Stromproduktion wird so ausgerichtet, dass sie bei kurzfristigen Nachfragespitzen erhöht und bei einem Überangebot zurückgefahren werden kann. Die Abwärmenutzung erfolgt subsidiär zur Stromproduktion.

Anforderungen: Die Stromproduktion soll einerseits die regelmässig auftretenden, bekannten Tagesspitzen versorgen. Andererseits ist sie insbesondere auch soweit zu flexibilisieren, dass sie auf die wetterabhängige Produktion aus erneuerbaren Energien reagieren kann. Dies wird zukünftig an Bedeutung gewinnen. Beim Wechsel zwischen Strom- und Wärmeproduktion in kürzeren Zeitabständen sind Möglichkeiten zur Wärmespeicherung notwendig.

Die dargelegten strategischen Optionen sind mit erheblichen Investitionen verbunden, welche die Flexibilität der Energienutzung einschränken. Da die zukünftige Entwicklung der Rahmenbedingungen, insbesondere Nachfrage nach Prozesswärme und Anforderungen an die Flexibilisierung der Elektrizitätsproduktion mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist, sollte die Optimierung der Energienutzung flexibel ausgestaltet werden. Die Ausrichtung der möglichen Massnahmen im nachfolgenden Kapitel wird zeigen, dass viele kleinere Optimierungsmöglichkeiten bestehen.

Für die weitere Arbeit wurde auf die Fokussierung auf eine der drei strategischen Optionen verzichtet. In den folgenden Kapiteln wird stattdessen eine multifaktorielle Optimierung geprüft, welche sich am Grundsatz der Wertigkeit der Energie mittels einer Exergie-betrachtung orientiert. Für die optimierte Energienutzung wird in Kapitel 5 eine Hierarchie der Anlagen zur Abfallverwertung abgeleitet.

4 Handlungsoptionen für die Transformation der Abfallwirtschaft

4.1 Beschrieb der Handlungsoptionen

Die nachfolgende Tabelle ist eine Auslegeordnung möglicher Handlungsoptionen. Sie stellt eine Art Werkzeugkasten für die Transformation der Schweizer Abfallwirtschaft hin zu einer «hohen und zeitlich optimierten» Energiebereitstellung dar.

Die Handlungsoptionen sind der Übersichtlichkeit halber in vier Bereiche mit Unterbereichen strukturiert

Struktur der Handlungsoptionen
Stoffströme lenken
Nach Verwertungskanälen (SV)
Zeitlich (SZ)
Grenzquerende Stoffströme (SG)
Energieangebot optimieren
Technisch (AT)
Zeitlich (AZ)
Örtlich (AO)
Energienachfrage optimieren
Technisch (NT)
Zeitlich (NZ)
Nicht zugeordnete Handlungsoptionen (ZZ)

Tabelle 8: Struktur der im Folgenden aufgeführten Handlungsoptionen

Lücken in der Nummerierung sind durch eine Vorselektion der Begleitgruppe entstanden, die gewisse Handlungsoptionen als wenig relevant oder nicht wirkungsvoll markiert hat. Diese werden im Folgenden nicht mehr dargestellt.

Vorbemerkung: Die nachfolgend dargestellten Handlungsoptionen basieren auf einer schrittweisen Weiterentwicklung in den Abfalltechnologien (Evolution statt Revolution). In den späten 1990er Jahr wurden diverse alternative Abfallbehandlungskonzepte diskutiert und mit grossem technischem und finanziellem Aufwand vorwärtsgetrieben. Aus diversen Gründen haben diese Technologien jedoch keinen Durchbruch erlebt. Die klassische Rostfeuerung in unterschiedlichen Ausprägungen hat die anderen Systeme bezüglich Flexibilität bei gleichzeitig hohen Standzeiten und überschaubarem Revisionsaufwand faktisch hinter sich gelassen. Für spezielle Anwendungen kommen Drehrohre (z.B. Sonderabfallverbrennung für Feststoffe) oder Wirbelschichtfeuerungen (z.B. Schlämme) zum Einsatz. Aus Energiesicht sind diese Technologien eher ungünstig bzw. nur mit grossem Aufwand auf einen gleichen Stand der Energienutzung zu bringen.

Stoffströme in optimale Verwertungskanäle lenken		
SV01	National koordinierte, regionale Kapazitäts- und Standortplanung für Abfallanlagen	Priorität
Beschrieb:	Eine nationale Koordination der Entsorgungsanlagen mit energetischen Mindestkriterien würde die Energieabsatzmöglichkeiten als Standortfaktor stärker berücksichtigen. Dies würde den Gesamtenergienutzungsgrad des Anlagenparks steigern.	hoch
Beurteilung:	Die energetische Wirkung hängt stark von der Stringenz der Koordination ab. Die (politischen) Verhandlungen sind komplex.	
SV02	Dynamische Zuordnung von Abfallfraktionen auf die Entsorger	Priorität
Beschrieb:	Abfälle sollen dann und dort energetisch genutzt werden können, wo sie am meisten Substitutionswirkung erzielen. Die Lenkung soll in die Anlagen mit den höchsten Nutzungsgraden erfolgen. In den Wintermonaten sind dies die Anlagen mit angeschlossenen Nah- oder Fernwärmenetzen. Sie müssen sich in diesen Zeiten oft zusätzliches Material (Abfall für KVA, Maissilage für Vergärungsanlagen) beschaffen. Hier sollten Konzepte zur → Abfalllagerung (SZ01) oder → Wärmespeichern (AZ01) gleichzeitig verfolgt werden.	hoch
Beurteilung:	Sehr hohes Potential zur Substitution von fossilen Energieträgern, speziell in Fernwärmegebieten und für die industrielle Nutzung. Bedingt hohe Flexibilität in heute sehr starren Systemen.	
SV03	Herstellung von Ersatzbrennstoffen	Priorität
Beschrieb:	Bereits heute werden ganze Abfallklassen eher der industriellen Feuerung zugeführt, als in eine Entsorgungsanlage gesteuert (z.B. Altreifen in Zementwerke). Diese Triage könnte noch vertieft werden. Eine Aussortierung von EBS aus dem Gemischtabfall macht dann Sinn, wenn das Ausgangsmaterial nicht stark verschmutzt ist (z.B. dank → Abfalltrennung mit Energiefokus (SV04)).	hoch
Beurteilung:	Bei ganzjährig produzierenden Industriebetrieben ist die so erzielbare Brennstoffsubstitution beachtlich. Spezielle Abgasvorkehrungen sind zu treffen und verteuern die Nutzung. Wichtig ist, dass laufend die energetische Gesamteffizienz beobachtet wird, damit nicht erneuerbare Energie in ineffizienten Prozessen verloren geht.	
SV04	Abfalltrennung mit Energiefokus	Priorität
Beschrieb:	Haushalte trennen neu 3 Abfallarten: trocken, nass, rezyklierbar in farblich unterschiedenen Säcken. Die Einsammlung kann gemeinsam erfolgen, Sortierstrassen trennen auf zwischen thermischer, biologischer und stofflicher Nutzung.	mittel
Beurteilung:	Trockene Abfälle lassen sich besser lagern und haben eine hohe Energiedichte. Feuchte Abfälle können vergoren und erst die Gärreste verbrannt werden.	
SV06	Verstärkte Ausschleusung des biogenen Anteils aus Siedlungsabfällen	Priorität
Beschrieb:	Noch sind rund 33% (Gewichtsprozent) des Siedlungsabfalls biogenen Ursprungs. Eine Ausschleusung würde den Heizwert des restlichen Materials erhöhen und die spezialisierte Behandlung des Restes (z.B. in Biogasanlagen) ermöglichen.	zurückgestellt
Beurteilung:	Kosten/Nutzenverhältnisse von Biogasanlagen rechtfertigen diesen Schritt kaum. Es ist stark verschmutztes Gärgut zu erwarten, das nicht mehr stofflich genutzt werden kann / darf. (→ Ziele sind eventuell mit SV04 besser zu erreichen)	
SV07	Vermiedener Primärenergieeinsatz als Bedingung für Separatsammlungen	Priorität
Beschrieb:	Separatsammlungen werden auf Materialien eingeschränkt, die im Recycling mehr Primärenergie einsparen als die energetische Nutzung bringen würde. Evtl. auch erweiterte LCA-Betrachtung des Recyclingprozesses notwendig, um mit UBP weitere Umweltauswirkungen abbilden zu können.	zurückgestellt
Beurteilung:	Wirkung ist unsicher, da die LCA-Analysen von Recyclingprozessen z.T. schwer vergleichbar sind. Eine rein energetische Sicht würde eine breite Palette an Umweltauswirkungen vernachlässigen.	

Stoffströme zeitlich lenken		
SZ01	Bewirtschaftung von Abfalllagern	Priorität
Beschrieb:	Abfall fällt kontinuierlich an. Der Energiebedarf (Heizenergie, Stromnachfrage) variiert. Die Lagerung von Abfällen ist heute nur begrenzt möglich und bedingt schnell grosse Flächen / Volumina. In Zukunft können solche Lager das System weiter flexibilisieren.	
Beurteilung:	Gekoppelt mit einer dynamischen Zuordnung auf den effizientesten Energienutzer haben solche Lager beachtliches energetisches Potential, da sie die Abfälle für die Nutzung am Ort mit der besten Substitutionswirkung bereithalten. Dies ist auch ein attraktives Geschäftsmodell mit einem Potential, zum Selbstläufer zu werden.	hoch
SZ03	Umladestationen in der Logistikkette vorsehen	Priorität
Beschrieb:	Sammeldienste werden dann teuer und ineffizient, wenn die Sammelfahrzeuge mit kleiner Nutzlast lange Wege zurücklegen müssen. Darum sind Umladestationen (Container, Übergabe an Grossfahrzeuge) zwar ein Kostenfaktor, energetisch jedoch zu begrüssen.	
Beurteilung:	Sammeldienst wird oft nicht als Energieverbraucher in die Effizienzüberlegungen einbezogen. Effekte schwierig zu beurteilen. Ansatz wäre geeignet, die Verwertungswege ab den Umladestationen zu flexibilisieren (in Anlagen mit aktuell hohem Energiebedarf) → Dynamische Zuordnung (SV02), Lagerung (SZ01)	mittel
SZ04	Saisonale Schwankungen abgleichen unter flexiblen Anlagen	Priorität
Beschrieb:	Koppelungen von saisonal agierenden Anlagen können win-win-Situationen zeigen: z.B. Mittelgrosse Kompostieranlage arbeitet nur von April bis Oktober, grosse Vergärungsanlage übernimmt die Wintermengen gerne (Mengenloch im Winter).	
Beurteilung:	Energetische Wirkung dann, wenn die saisonalen Schwankungen so verlagert werden können, dass zu Zeiten hohen Bedarfs die Abfallenergie genutzt werden kann. Es stellt sich auch die Frage, ob solche Modelle von aussen angeregt werden können (Industrielle Ökologie?)	mittel
Grenzquerende Stoffströme aus Energiesicht steuern		
SG01	Import / Export unproblematischer Abfälle aus Energiesicht steuern	Priorität
Beschrieb:	Ablösung der Insel-Wahrnehmung für die Entsorgung «banaler» Abfälle, die aus energetischer Sicht die Grenzen queren sollten. Importregime wie für fossile Treibstoffe, evtl. mit CO ₂ -Abgabe etc. Bei Exporten die Energiekomponente einbeziehen und entsprechend steuern.	
Beurteilung:	Neben dem hohen energetischen Nutzen kann – dank dem hohen Standard der Schweizer Abfallwirtschaft – auch von einem sehr grossen ökologischen Nutzen (gegenüber z.B. wilder Deponierung in ehemaligen Ostblockstaaten) ausgegangen werden. Bei Abfallexporten könnten energetische oder CO ₂ -Gegengeschäfte vereinbart werden.	hoch
SG02	Exporte von energiereichen Abfällen regulieren	Priorität
Beschrieb:	Alle Exporte werden auf ihren Energieinhalt und ihre CO ₂ -Wertigkeit hin beobachtet. Falls grosse Ströme den übergeordneten nationalen Interessen widersprechen (Eigenversorgungsgrad, CO ₂ -Reduktion) müsste rasch eine entsprechende Regulierung erfolgen.	hoch
Beurteilung:	Brennstoffverfügbarkeit für Verbrennungsanlagen könnte schlagartig steigen.	

Energieangebot technisch optimieren		
AT01	Einschränkungen aus historischen Umweltauflagen prüfen	Priorität
Beschrieb:	Teilweise schränken überholte Umweltauflagen die Energieoptimierung auf Abfallanlagen stark ein (z.B. hohe Temperaturen der Rauchgase am Kaminaustritt). Eine Neubeurteilungung könnte grosse zusätzliche Energiemengen «freispielen».	hoch
Beurteilung:	Hohe energetische Wirkung, evtl. schwierige Interessensabwägung im Einzelfall.	
AT02	Stromproduktion dank Flusswasserkühlung steigern	Priorität
Beschrieb:	Beachtlich viele Schweizer KVA befinden sich in unmittelbarer Nähe grosser Fließgewässer. Mit Wasserkühlung lässt sich die Stromproduktion gegenüber einer Luftkühlung um einige %-Punkte steigern. Der Wegfall der KKW mit Flusskühlung dürfte «Kontingente» frei machen.	hoch
Beurteilung:	Energetisch hohe Wirkung. Ökologisch evtl. schwierig zu vertreten, wenn Flüsse zu stark aufgeheizt würden (oder dies befürchtet wird).	
AT03	Konsequente und systematische Optimierung des Eigenbedarfs	Priorität
Beschrieb:	In standardisierten Analyseprogrammen (Grob-/Feincheck, Pinch-Methode, Exergieanalyse etc.) werden die Energieflüsse im Betrieb inventarisiert und die Prozessanforderungen hinterfragt.	hoch
Beurteilung:	Einsparungen von 10-20% sind durch Betriebsoptimierungsmassnahmen möglich. Wirtschaftlichkeit der Umsetzung oft durch tiefe Energieverkaufserlöse stark beeinträchtigt.	
AT04	Rauchgas- und/oder Abluftkondensation zur Nutzung der latenten Wärme	Priorität
Beschrieb:	Sobald eine Wärmesenke bei rund 60°C vorhanden ist (idealerweise ein Tieftemperatur-Wärmenetz), kann durch die Rückkondensation der Rauchgase / der feuchten Abluft ein beträchtlicher Teil der latenten Energie zurückgewonnen werden. In Skandinavien sind solche Systeme im Einsatz, in der Schweiz noch gar nicht. → Anergienetze (NT01) und Tieftemperaturnutzung (NT02)	hoch
Beurteilung:	Hoher energetischer Nutzen im MW-Bereich pro Anlage, ausschlaggebend ist der Bedarf auf dem Tieftemperaturniveau. Wäre zwingend vorzusehen für Anlagen, die zur Heizwertsenkung in grossen Mengen Wasser in den Brennraum eindüsen.	
AT05	Luko-Abwärme für Anergieanwendungen nutzbar machen	Priorität
Beschrieb:	Thermische Kraftwerke mit Kondensationsturbinen müssen den «kalten» Dampf auskondensieren. Meist geschieht dies über Luftkondensatoren. Ein vorgeschalteter Kondensator mit Wärmetauscher kann einen grossen Teil der sonst ungenutzten Niedertemperaturwärme für Betriebe mit Tieftemperatur-Wärmebedarf (40-50°C) nutzbar machen. → Anergienetze (NT01) und Tieftemperaturnutzung (NT02)	hoch
Beurteilung:	Energetische Bedeutung hängt stark von der Nachfrage nach Wärme auf tiefem Temperaturniveau ab. Kaum Risiken, div. Anlagen haben entsprechende Systeme in Betrieb. Falls Temperaturen nicht ausreichen, kann mit Dampf nachgeheizt werden (direkt oder über Injektoren).	
AT06	Vermehrte Stromproduktion in industriellen Heizkraftwerken	Priorität
Beschrieb:	Die wenigsten industriellen Dampfanlagen sind mit einer Wärme-Kraft-Koppelung ausgerüstet. Auch aus der Verbrennung von Lösungsmitteln und Altholz könnte Strom gewonnen werden.	
Beurteilung:	Schwierig umzusetzen, da Stromproduktion oft mit hohen Investitionskosten verbunden ist, welche nur langfristig abgeschrieben werden können. Die Privatwirtschaft scheint noch kaum daran interessiert zu sein.	mittel

Energieangebot zeitlich optimieren		
AZ01	Wärmespeicher aufbauen	Priorität
Beschrieb:	Wasser kann sehr viel Wärme aufnehmen und ist daher ein gutes Speichermedium. Je nach Anwendung können grosse oder kleinere Speicher, drucklos oder bis 160°C die Effizienz des Gesamtsystems massiv verbessern, indem sie Wärmelieferungen sicherstellen oder auch die Stromproduktion kurzzeitig erhöhen können.	hoch
Beurteilung:	Grosses Potential für die zeitlich optimierte Stromproduktion. Speicher können vorausschauend bewirtschaftet werden.	
AZ02	Dampfproduktion in der KVA flexibilisieren	Priorität
Beschrieb:	Die hochkomplexen Regelkreise einer KVA machen es attraktiv, einen optimalen Betriebspunkt zu suchen und diesen möglichst gleichmässig zu fahren. Als Indikator dient meist eine konstante Dampfproduktion. Die Kessellast kann im Rahmen der Anlageparameter jedoch technisch zwischen 80-120% variiert werden, wenn Systeme und Personal entsprechend dafür eingestellt sind ¹³ . Bei Zweilinienanlagen kann (bei Vollabschaltung einer Linie) ein Spektrum von 40-120% der Anlagenkapazität abgedeckt werden.	hoch
Beurteilung:	Sehr hohes Potential insbesondere für Verschiebungen im Tagesgang, da der Steuerung des Eigenbedarfs enge Grenzen gesetzt sind. Abschaltungen ganzer Linien sind nur in einer saisonalen Fahrweise sinnvoll, da Anfahr- und Abfahrvorgänge mehrere Stunden bis Tage dauern.	
AZ03	Flexibilisierte Fahrweise der Turbine, des BHKW	Priorität
Beschrieb:	Die Stromerzeugung auf Abfallanlagen (Turbinen, BHKW) wird regelungstechnisch so eingebunden, dass die Gesamtleistung der Anlage geregelt werden kann. Damit kann eine Leistung garantiert werden.	hoch
Beurteilung:	Relativ einfach umzusetzen. Erlaubt eine «Feinjustierung», wenn nach vereinbartem Fahrplan eingespeist werden muss.	
AZ04	Überkapazitäten bewirtschaften statt verringern	Priorität
Beschrieb:	Damit eine kurz- oder mittelfristige Leistungssteigerung einer KVA möglich ist, muss, diese über «Reserven» verfügen, welche aktiviert werden können. Falls im Zuge der koordinierten Planung in einer gewissen Region Kapazitäten abgebaut werden, verliert das Gesamtsystem (allerdings sehr teure) Reservekapazität. Zur bedarfsgerechten Stromerzeugung in Spitzenzeiten muss der Anlagenpark in der Lage sein, kurzzeitig höhere Leistungen zu fahren.	mittel
Beurteilung:	Zwingend, um vom Bandlastcharakter abweichen zu können ohne Energie zu verschenken ¹⁴ . Schwierig, da diese Denkweise eine Kehrtwende vieler Akteure bedarf und ihre Finanzierbarkeit unklar ist ¹⁵ .	
AZ05	Gasspeicher auf Biogasanlagen	Priorität
Beschrieb:	Statt das Biogas sofort zu verstromen, könnte es auch in einem Gasspeicher gepuffert und erst in Zeiten grossen Bedarfs auf die (mit ausreichenden Leistungsreserven versehenen) BHKW geleitet werden. Eine teurere Alternative ist die Aufbereitung auf Erdgasqualität, Einspeisung und Pufferung im Erdgasnetz mit anschliessend hocheffizienter Verstromung in modernen GuD-Kraftwerken.	zurückgestellt
Beurteilung:	Biogas hat energetisch im Abfallsystem einen sehr geringen Stellenwert (einige Prozent). Daher ist die Flexibilisierung ausser bei Grösstanlagen kaum ein volkswirtschaftlich kosteneffizienter Beitrag.	

¹³ Bei moderneren Anlagen kann diese Spannbreite kleiner sein, wenn bereits in der Auslegung vollständig optimiert wurde und dementsprechend keine Leistungsreserven mehr vorliegen (Hinweis eines Betreibers).

¹⁴ Z.B. Tertiärregelenergie durch Drosselung der Turbinenleistung, indem Dampf über Dach weggekühlt wird.

¹⁵ Diese Grundidee ist +/- analog zur unrentablen aber zwingend nötigen Vorhaltung fossiler Kraftwerke in einem hochgradig durch Wind und Sonne dominierten Erzeugungssystem (aktuelle Diskussion in Deutschland)

Energieangebot örtlich optimieren		
AO01	Zentrale, grosse, hocheffiziente Anlagen	Priorität
Beschrieb:	Je grösser eine Entsorgungsanlage ist, desto mehr Möglichkeiten zur Energieeffizienzsteigerung können wirtschaftlich realisiert werden. Andererseits ist gerade bei sehr grossen Anlagen eine hohe Ausnutzung der Abwärme kaum möglich, ausser wenn sie industrielle Kunden (Klumpenrisiko!) beliefern.	hoch
Beurteilung:	Erst die konsequente und energiebasierte Kapazitäts- und Standortplanung (SV01) wird aufzeigen können, ob es geeignete Standorte für Grossanlagen gibt.	
AO02	Dezentrale, kleine, nachfrageorientierte Anlagen	Priorität
Beschrieb:	Es wäre logistisch und energetisch sinnvoll, Kleinanlagen im MW-Bereich in Nahwärmenetzen direkt mit dem lokal anfallenden Abfall zu betreiben. Noch existieren in der Schweiz keine solchen Systeme, die auch die Vorgaben des Umweltschutzes einhalten würden (Luftreinhaltung, Ausbrandqualität). In Skandinavien sind solche Anlagen gebaut worden.	hoch
Beurteilung:	Energetisch hochinteressant, müsste jedoch durch Abfalllager oder Grossanlagen «gepuffert» werden, dass die Abfälle auch zu Zeiten tiefer lokaler Wärmenachfrage andernorts effizient genutzt werden können.	
AO04	Energetische Mindestanforderungen für Abfallanlagen	Priorität
Beschrieb:	Erreicht eine Abfallanlage die geforderte Mindesteffizienz nicht (mehr) wird ihr nach Ablauf einer Nachbesserungsfrist die Betriebsbewilligung entzogen oder eine Pönale für die mangelnde Effizienz in Rechnung gestellt.	mittel
Beurteilung:	Hätte eine hohe Signalwirkung und führt am direktesten zu einer Effizienzsteigerung im geforderten Ausmass. Aktuell besteht dafür noch keine gesetzliche Grundlage auf nationaler Ebene.	
Energienachfrage technisch optimieren		
NT01	Anergienetze	Priorität
Beschrieb:	Für die Verteilung von Abwärme auf tiefem Temperaturniveau (< 60°C) müssten neue Netze aufgebaut werden. Dabei ist zu bedenken, dass wegen der relativ kleinen Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf verhältnismässig grosse Wassermengen bewegt werden müssen, um die beim Abnehmer benötigte Leistung transportieren zu können.	hoch
Beurteilung:	Die Einrichtung solcher Netze wäre sehr sinnvoll. Durch die grossen Leitungsquerschnitte können sie jedoch relativ teuer werden.	
NT02	Neue Arten der Energienutzung auf tiefem Temperaturniveau	Priorität
Beschrieb:	z.B. mit Niedertemperatur-Wärme versorgte Gewächshäuser, Fischzuchten, Urban Farming, Algenzucht, Trocknungsanwendungen.	mittel
Beurteilung:	Schwierig, völlig neue Branchenkenntnisse nötig. Direktabnehmer mit möglichst gemeinsamer Steuerungseinheit kann sehr schöne win-win-Effekte hervorbringen.	
Energienachfrage zeitlich optimieren		
NZ01	Optimierungen in Fernwärmenetzen	Priorität
Beschrieb:	Oftmals verhindert die Zuständigkeitsverteilung zwischen Fernwärme und Wärmeerzeugungsanlage eine durchgängige energetische und wirtschaftliche Optimierung (z.B. Reduktion der Netzverluste, Absenkung der Vorlauftemperatur, Sanierung kritischer Wärmebezügler etc.). Eine übergeordnete Betrachtungsweise könnte win-win-Lösungen ergeben. Sie muss allerdings meist von aussen angestossen werden.	hoch
Beurteilung:	Grosses Potential im Zusammenspiel mit Gebäudesanierungsprogrammen in Fernwärmegebieten. Stadtwerke wären richtig aufgestellt für eine Gesamtbetrachtung, suchen jedoch oft nach klaren Grenzen.	
NZ03	Lokale Wärmespeicher bei Fernwärmebezüglern	Priorität
Beschrieb:	Statt mit zentralen Speichersystemen im Fernwärmenetz kann auch auf Bezügerseite ein Wärmespeicher eingerichtet werden, der sich «smart» aus dem Fernwärmenetz belädt. Er bezieht Wärme, wenn die Rücklauftemperaturen ansteigen und versorgt das lokale Heizsystem, wenn die Wärme aus dem Netz knapp wird.	mittel
Beurteilung:	Könnte eine interessante Option im Zusammenhang mit Solarthermie bei Fernwärmebezüglern sein. Bei einem Wechsel von Heizöl auf Fernwärme könnte der bestehende Raum des alten Öltanks für eine Wärmespeicherung genutzt werden.	

Energienachfrage örtlich optimieren		
NO01	Industriecluster für energieintensive Betriebe	Priorität
Beschrieb:	Ausscheidung von Industriezonen rund um Entsorgungsanlagen mit grossen Abwärmemengen. Gleichzeitige Vermarktung der Energiebezugsmöglichkeiten als Standortvorteil.	
Beurteilung:	Wärme aus KVA kann auch bei durchgängiger transparenter Kostenrechnung viel kostengünstiger angeboten werden als konventionell erzeugte Wärme. Daher sollte sich die Nähe zur KVA für die Industrie lohnen.	hoch
NO02	Entsorgungscluster mit gegenseitiger Energienutzung	Priorität
Beschrieb:	Werden Energieerzeugung und –nutzung möglichst nahe beieinander angesiedelt, können die Netze und Transformatoren entlastet werden.	
Beurteilung:	Aus energetischer Sicht keine extremen Einsparpotentiale ersichtlich.	mittel
Nicht zugeordnet		
ZZ01	Abfallvortrocknung für Heizwerterhöhung und bessere Lagerbarkeit	Priorität
Beschrieb:	Trockene Abfälle sind biologisch weniger aktiv (den Bakterien fehlt das Wasser), haben einen höheren Heizwert und lassen sich besser lagern (weniger Geruchsentwicklung). Die investierte Wärme für die Vortrocknung sollte quantitativ bei der späteren Verbrennung wieder anfallen.	mittel
Beurteilung:	Bisher keine Betriebserfahrungen (ausser KBA Hard, Schaffhausen). Grosse Geruchsentwicklung im Trocknungsverfahren.	
ZZ02	Effizienzvorgaben für Vergärungsanlagen	Priorität
Beschrieb:	Die Biogasproduktion aus biogenen Abfällen ist mit bis zu 120 Nm ³ /t zwar beträchtlich. Die Bilanzierung des Gesamtprozesses (Sammlung, Aufbereitung, Methanschluß, Energie für die Gasaufbereitung, Weiterbehandlung des Gärrestes) führt immer wieder zu kontroversen Diskussionen. Statt Grundsatzdiskussionen sollte ein Nachweispflicht für die Energieeffizienz analog den KVA eingeführt werden.	mittel
Beurteilung:	Biogasproduktion ist spezifisch sehr teuer. Mit einer Lenkung nach energetischen Kriterien könnte ein Anreiz zur Effizienzmaximierung gegeben werden (Kosten des Anlagebetriebs werden heute zu ca. 80% über Anliefergebühren gedeckt).	
ZZ04	Trennung der Energie- und Abfallrechnung	Priorität
Beschrieb:	Durch eine möglichst konsequente Trennung der Kostenstellen «Entsorgung» und «Energienutzung» kann ein definierter Transferpreis am Übergabepunkt des Hochdruckdampfes festgelegt werden. Danach müssen sich Erneuerungsinvestitionen oder Effizienzsteigerungen im Einzelbereich amortisieren lassen, damit keine Quersubventionierung stattfindet.	mittel
Beurteilung:	Die Kostentransparenz bei Leistungserbringern der öffentlichen Hand bringt einen Teil der Marktmechanismen in die Geschäftstätigkeit zurück. Die energetische Wirkung ist nicht bezifferbar, die Klarheit für kostenbasierte Tarife und / oder Förderinstrumente dürfte jedoch sehr hilfreich sein.	

Tabelle 9: Handlungsoptionen für die Transformation der Schweizer Abfallwirtschaft

4.2 Wechselwirkungen der Handlungsoptionen

Alle in Kapitel 4.1 aufgeführten Handlungsoptionen wurden einander in einer Einflussmatrix gegenübergestellt. Diese dient der Bewertung, ob sich zwei Handlungsoptionen gegenseitig ausschliessen oder behindern, gleichläufig sind oder sich verstärken bzw. ob sie sich neutral verhalten. Der überwiegende Teil der Einflüsse wurde als neutral beurteilt. Zudem überwiegen die positiven Beeinflussungen zwischen den Handlungsoptionen die negativen Einflüsse stark. Bei den negativen Einflüssen wurden nur zwei sich technisch ausschliessende Optionen festgestellt: Die Flusswasserkühlung (AT02) verhindert die Abwärmenutzung von den (nicht vorhandenen) Luftkondensatoren (AT05).

Die folgenden Handlungsoptionen haben den grössten verstärkenden Effekt auf andere Handlungsoptionen (absteigende Reihenfolge des Verstärkungseffektes):

- ZZ04 Trennung der Energie- und Abfallrechnung
- SV02 Dynamische Zuordnung von Abfallfraktionen auf die Entsorger
- AO01 Zentrale, grosse, hocheffiziente Anlagen
- AZ01 Wärmespeicher aufbauen
- SZ01 Bewirtschaftung von Abfalllagern
- AO04 Energetische Mindestanforderungen für Abfallanlagen
- SV01 Nationale koordinierte, regionale Kapazitäts- und Standortplanung für Abfallanlagen
- NT01 Anergienetze
- NO01 Industriecluster für energieintensive Betriebe

Das Resultat der Beurteilung ist in Anhang A-10 im Detail abgebildet.

5 Grundsätze der Optimierung

Als Grundlage für die Beschreibung der Transformation der Abfallverwertung werden zunächst die Grundsätze bestimmt, nach welchen die energetische und zeitliche Optimierung erfolgen soll. Sobald fest steht, dass ein Abfallstrom nicht stofflich genutzt werden kann (siehe Kap. 5.1), dienen als Hauptkriterien die Energieausbeute der verschiedenen Energienutzungsarten sowie der Grad der Substitution fossiler Ressourcen durch «Abfallenergie». Erste Priorität hat dabei eine exergetisch maximale Energieausbeute. Das bedeutet, dass eine möglichst hochwertige Nutzung der Energie in den Abfällen erreicht werden soll. Erst bei exergetisch ähnlichen Kennwerten wird als zweite Priorität die erzielbare Substitution fossiler Ressourcen herangezogen.

Ein weiterer Grundsatz der Optimierung betrifft den Export von Abfällen. Heute werden bedeutende Abfallströme ins Ausland exportiert. Als Grundsatz soll gelten, dass die inländische Energienutzung dem Export vorgezogen werden soll. Das bedeutet, dass eine Umlenkung der Stoffströme auf inländische Anlagen priorisiert wird.

5.1 Stellenwert von Recycling und energetischer Nutzung

Bei der Analyse, welcher Verwertungsweg für einen Stoffstrom optimal ist, ist die erste Entscheidung zwischen der energetischen Nutzung und der stofflichen Wiederverwertung durch einen Recyclingprozess zu treffen. Für diese Abwägung ist eine Ökobilanzbetrachtung der beiden Alternativen notwendig. Entscheidende Faktoren sind dabei:

- der Energiebedarf des Recyclingprozesses im Vergleich zur Energieausbeute bei der energetischen Nutzung,
- die Substituierbarkeit von Primärmaterial durch das Rezyklat,
- die Umweltauswirkungen der Verwertung
- sowie die Rohstoffverfügbarkeit für das Primärmaterial.

Bisherige Untersuchungen mit LCA-Werkzeugen zeigen, dass bei den heute in der Schweiz rezyklierten Stoffen (z.B. PET, Metalle) der Aufwand für die Herstellung des Primärmaterials immer höher ist als der Energiegewinn bei der Verbrennung des Stoffes. Deshalb ist das Recycling solcher Stoffe aus Umwelt- und Energiesicht sinnvoll und die etablierten Recyclingprozesse werden nicht in Frage gestellt.

5.2 Hierarchie der Nutzung für die Lenkung von Stoffströmen

Die folgende Prioritätenreihenfolge der energetischen Nutzungswege von Abfällen basiert auf der Berechnung der exergetischen Wirkungsgrade der verschiedenen Anlagentypen. Der Wirkungsgrad wurde sowohl für Wärme wie auch für Strom ausgewiesen und zu einem Gesamtwirkungsgrad zusammengefasst. Die Berechnung wurde – da die exergetische Bewertung eines Wärmestroms von der Referenz- bzw. Aussentemperatur abhängt

– für das Winter- und Sommerhalbjahr separat durchgeführt und auf einen Jahresdurchschnitt umgerechnet. Die Resultate sind in der untenstehenden Tabelle 10 dargestellt. Die Berechnungsweise folgt der Logik des ÖWAV-Regelblattes 519 (Österreichische Effizienznorm für Abfallverbrennungsanlagen). Auf EU-Ebene existieren keine entsprechenden Vorgaben.

Die Tabelle enthält – ergänzend und zur weiteren Klassierung der sich nur wenig unterscheidenden Exergiewerte in den unteren Bereichen – auch eine Abschätzung der Substitutionswirkung in Bezug auf fossile Energieträger. Auf der thermischen Seite wird die direkte Substitution betrachtet (= wenn keine Abfallenergie zur Verfügung steht, muss fossile Energie eingesetzt werden). Die Substitutionswirkung durch die Stromproduktion aus Abfällen ersetzt den «Grenzstrom», der andernfalls im System fehlen würde und in fossil befeuerten, hocheffizienten Gas- und Dampfkraftwerken erzeugt werden müsste. Dabei erreicht auch eine hocheffiziente KVA-Verstromungstechnik von 25% Netto-Produktion nur die Wertung «Mittel», weil ein GuD mit knapp 60% das durch die Wärmeanlagen eingesparte Gas viel effizienter in Strom umwandeln könnte, als dies mit abfallstämmigen Brennstoffen möglich ist. Daher ist auch aus der Substitutionsbetrachtung die direkte Nutzung der Abfallwärme der Verstromung vorzuziehen.

Durchschnittliche Jahresnutzungsgrade		Direkte Verbrennung (Zementwerk)	Ind. Heizkraftwerke/ Sonderverbrennungen	KVA im Industrieverbund (Typ 1)	Fernwärme-KVA in Bandlast (Typ 2)	Fernwärme-KVA, saisonale Betriebsweise (Typ 3a)	Strom-KVA (Typ 4)	Wärme/Strom-KVA, ganzjährige Volllaastung (Typ 3)
Abfall	100% Exergie	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Wärmeabgabe		75%	70%	70%	61%	57%	0%	36%
Stromabgabe	100 % Exergie	3%	5%	5%	14%	15%	24%	16%
Anlagenwirkungsgrad								
Thermisch ¹⁶	$\eta_{A\ th}$	0.75	0.70	0.70	0.61	0.57	0.00	0.36
Elektrisch	$\eta_{A\ el}$	0.03	0.05	0.05	0.14	0.15	0.24	0.16
Gesamt	$\eta_{A\ gesamt}$	0.78	0.75	0.75	0.75	0.72	0.24	0.52
Exergetischer Anlagenwirkungsgrad								
Thermisch	$\eta_{A\ exerg.\ th}$	0.54	0.27	0.27	0.11	0.10	0.00	0.06
Elektrisch	$\eta_{A\ exerg.\ el}$	0.03	0.05	0.05	0.14	0.15	0.24	0.16
Gesamt	$\eta_{A\ exerg.\ gesamt}$	0.56	0.32	0.32	0.25	0.25	0.24	0.22
Substitutionswirkung								
Thermisch	Ersatz fossiler Brennstoffe	Vollständig	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Hoch	Kein	Mittel
Elektrisch	Ersatz fossil erzeugter kWh ¹⁷	Marginal	Marginal	Marginal	Tief	Tief	Mittel	Tief
Gesamter Substitutionseffekt		Sehr hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Mittel	Mittel	Tief
Effizienzkennzahlen und Gesamtrangierung der Systeme für die Abfallverwertung								
Priorität (Rang)		1	2 (ex aequo)	2 (ex aequo)	3	4	5	6
Zur Info: heute gebräuchliche Effizienzkennzahlen mit starker Wärme-Gewichtung								
Europäische R1-Kennzahl	Stromproduktion * 2.6, Wärmenutzung * 1.1	-	1.01	1.01	1.19	1.16	0.84	0.93
Energetische Netto-Effizienz	Stromabgabe * 2.6, Wärmeabgabe * 1.1	-	0.93	0.93	1.06	1.02	0.65	0.78

Tabelle 10: Berechnung der exergetischen Anlagenwirkungsgrade im Jahresdurchschnitt, Darstellung der Substitutionswirkung fossiler Brennstoffe und Herleitung der «energieoptimalen» Nutzungskaskade für die optimierte Abfallwirtschaft. (s. auch Anhang A-11 für die detaillierte Herleitung der exergetischen Wirkungsgrade). Die heute gebräuchlichen Effizienzkennzahlen (R1 / ENE) sind in der Gewichtung zwischen Strom und Wärme eher politisch geprägt und berücksichtigen die Wertigkeit der Wärmeströme nicht gebührend.

Im Folgenden werden die verschiedenen Anlagentypen gemäss ihrer Prioritätenreihenfolge für die energetische Nutzung von Abfällen beschrieben.

¹⁶ Teilweise werden Wärmemengen auf verschiedenen Temperaturniveaus abgegeben. Diese sind in Abhängigkeit der Temperatur exergetisch gewichtet worden. Eine direkte Vergleichbarkeit ist daher nicht gegeben. Der Anhang A-11 liefert die entsprechenden Details.

¹⁷ Benchmark müsste ein modernes GuD-Kraftwerk mit einem elektrischen Wirkungsgrad von annähernd 60% sein (Optimale Brennstoffausnutzung bei minimalen CO₂-Emissionen pro fossil erzeugter kWh).

Direkte Verbrennung (Zementwerk)

Ganzjähriger Einsatz von als Brennstoff geeigneten Abfällen direkt in einem Verarbeitungsprozess (v.a. im Zementwerk); kombiniert mit Abwärmenutzung (ORC und Niedertemperaturabwärme) für eine hohe Gesamtenergieausnutzung. In der Regel kann durch den Einsatz von Abfällen 100% fossile Energie substituiert werden.

In der Schweiz erfolgt dieser Nutzungsweg in erster Linie in den Zementwerken. Beim Verbrennungsprozess im Zementwerk entstehen keine Abfälle, sämtliche Materialkomponenten, welche auf einem Temperaturniveau von 1'500°C nicht flüchtig sind, werden in den Klinker eingebunden. Der klassische Brennstoff im Zementwerk ist Kohle, daher sind alle Brennstoffe geeignet, die sauberer sind als Kohle. Sie dürfen allerdings keine leichtflüchtigen Metalle enthalten (Liechti, J. 2009).

Industrielle Heizkraftwerke und Sonderverbrennungen (Industriefeuerungen für Lösungsmittel, Altholz; Monoverbrennungen für Klärschlämme, Sonderabfallverbrennungsanlagen etc.)

Typischerweise haben Industrielle Heizkraftwerke und Sonderverbrennungen ein gegenüber KVA eingeschränktes Brennstoffspektrum - z.B. sauberes Altholz, Lösungsmittel etc. – und nutzen die anfallende Wärme direkt zur Wärmeversorgung in der Industrie. Sie haben nicht zwingend einen KVA-Standard bezüglich Rauchgasreinigung. Der Idealtypus einer industriellen Feuerung ist die direkte und bedarfsgerechte Produktion von Dampf/Prozesswärme für die angegliederten Prozesse, die sonst fossil befeuert würden. Eine Verstromung des Frischdampfes bis auf die Prozessdampfparameter hinunter ist möglich. In der Regel substituieren solche Anlagen 100% fossile Energie. Holzheizkraftwerke, die nur Strom produzieren, gehören nicht zu diesem Anlagentyp (Bsp. Tegra).

Beispiel: Restholzfeuerung der Papierfabrik Utzensdorf

In industriellen Prozesswärmeanlagen ist das primäre Ziel die Erzeugung von Wärme mit einem guten Wirkungsgrad, abhängig vom verwendeten Brennstoff. Mit flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen werden Wirkungsgrade von 93-95%, mit Holz etwa 85% erreicht. Zur Verwendung von Abfällen als Brennstoffe müssen diese ähnliche Charakteristika aufweisen wie die substituierten Brennstoffe; das bedeutet sehr schadstoffarme Abfälle mit hohen Heizwerten (Liechti, J. 2009).

Ebenfalls in diese Kategorie fallen die Spezialverbrennungsanlagen (z.B. Klärschlammverbrennungen, Sondermüllöfen etc.). Sondermüllverbrennungen eignen sich für Abfälle, welche in KVA oder andern Verbrennungsanlagen Probleme in der Handhabung verursachen oder nur unvollständig abbrennen, nicht verbrannt werden können oder dürfen. Solchen Anlagen stehen wegen den teilweise sehr aggressiven Rauchgasen im Kessel nicht alle Energienutzungs- und -optimierungsmöglichkeiten anderer Anlagen offen. Das primäre Ziel ist die umweltgerechte Entsorgung und allenfalls eine Rohstoffrückgewinnung. Klärschlammverbrennungsanlagen werden in Zukunft zunehmen, um die Forderung der Phosphorrückgewinnung erfüllen zu können. Die energetischen Überschüsse solcher Anlagen sind (bei Berücksichtigung des Trocknungsaufwandes) minim und sind daher in dieser Studie nicht betrachtet.

KVA im Industrieverbund (Typ 1)

Solche KVA geben hauptsächlich und ganzjährig Prozesswärme ab (150-250°C). Der erzeugte Strom ist dabei ein «Nebenprodukt». Diese Anlagen benötigen ganzjährig konstante Abfallmengen, die thermische Energie wird praktisch ausschliesslich als Prozesswärme genutzt, inklusive Verstromung (Gegendruckturbine) bis zum Temperaturniveau des Dampfbezügers. In der Regel ebenfalls 100% Substitution fossiler Energie.

Beispiel: Perlen, früher KEBAG

Fernwärme-KVA in Bandlast (Typ 2)

KVA mit ganzjähriger Fernwärmeabgabe mit Leistungsspitzen im Winter (z.B. Vorlauftemperaturen von 120° im Winter, 80° im Sommer) zur Bandlastversorgung in grossen Fernwärmenetzen. Gegendruckturbine zur Verstromung bis auf das erforderliche Fernwärme-Temperaturniveau (evtl. saisonal variierend), Strom ist dabei ebenfalls «Abfallprodukt». Für den Wärmenutzungsanteil hoher Substitutionsgrad fossiler Energie.

Beispiel: KHKW Hagenholz

Fernwärme-KVA mit saisonaler Betriebsweise (Typ 3a)

Dieser KVA Typus pendelt im saisonalen Wechselbetrieb zwischen hauptsächlich Wärme- und Stromproduktion mit Restwärmenutzung. Im Winter dominiert die Wärmeabgabe an regionale Fernwärmenetze (ca. 5000 h/a FW), im Sommer die forcierte und effiziente Stromproduktion, wenn möglich mit Abwärmenutzungsoptionen (vgl. KVA Typ 4) oder Anergienutzung, evtl. Fluss- oder Seewasserkühlung. I.d.R. teure Anlagen da sie in beiden Betriebsweisen effizient ausgelegt sein müssen. Für den Wärmenutzungsanteil hoher Substitutionsgrad fossiler Energie. Die optimalen Werte könnten dann erreicht werden, wenn der Betrieb im Sommer auf ein Minimum reduziert wird (vgl. Anhang A-12).

Beispiel: KVA Thun (bis vor kurzem, seit 2013 mit Dampfabgabe an Grosswäscherei)

Strom-KVA (Typ 4)

Strom-KVA ohne Wärmeabgabe und mit hocheffizienter, ganzjähriger Stromproduktion. Sie ist mit einer Kondensationsturbine mit Wasserkühlung ausgerüstet, um möglichst tief in den Unterdruck verstromen zu können (Fluss- oder Seekühlung, eine Anlage mit 500'000 Jahrestonnen benötigt rund 130 MW Rückkühlleistung). Allenfalls könnte eine Wärmenutzung mit einer Entnahme auf sehr tiefem Niveau (z.B. 45-60°C) zur Versorgung von Anergienetzen, Gewächshäusern, Fischzuchten etc. vorgesehen werden. Geringer Substitutionsgrad fossiler Energie.

Ebenfalls in diese Kategorie fallen Anlagen, die eine reine Verstromung von Altholz betreiben.

Beispiel: KEBAG heute (auch wenn aktuell die Fernwärme ausgebaut wird)

Biogas- und Vergärungsanlagen

Da Biogas- und Vergärungsanlagen nur für biogene Abfälle relevant sind, werden sie nicht der Prioritätenfolge unterstellt. Für die Nutzung in Biogasanlagen sind alle biologisch abbaubaren Materialien als Rohstoffe geeignet. Die Zusammensetzung der Methan/Kohlendioxid-Ausbeute hängt dabei von der Biomassezusammensetzung ab. Der Gesamtenergienutzungsgrad der Anlage setzt sich aus dem CH₄-Ertrag, dem Wirkungs-

grad der Anlage und der Wärmenutzung zusammen. Vergärungsanlagen sind für alle nassen Abfälle geeignet, welche abbaubares organisches Material enthalten, und konkurrenzlos (Liechti J. 2009).

Gestützt auf den exergetischen Gesamtwirkungsgrad der Anlagen (vgl. Tabelle 10) erfolgt die Stoffstromverteilung im Modell für eine energetisch und exergetisch optimierte Nutzung in dieser Reihenfolge:

- Direkte Verbrennung geeigneter Abfallfraktionen in der Industrie (Zementwerk)
- Industrielle Heizkraftwerke und Sonderverbrennungen
- KVA im Industrieverbund (Typ 1)
- Fernwärme-KVA in Bandlast (Typ 2)
- Fernwärme-KVA mit saisonaler Betriebsweise (Typ 3a)
- Strom-KVA, deren Standorte für eine optimale Stromproduktion geeignet sind (Typ 4)

5.3 Optimierte Zuordnung auf die besten Entsorgungs-/Nutzungswege

Für das Jahr 2035 wurden die zukünftigen Abfallmengen pro Fraktion bereits im Referenzszenario «Weiter wie bisher» ermittelt. Diese werden nun gemäss der in Kapitel 5.2 festgelegten Hierarchie auf die geeignetsten Anlagentypen gelenkt. Bei der Umlenkung wird aber auch der zukünftige Energiebedarf berücksichtigt, insbesondere die Nachfrage nach Prozesswärme und Fernwärme, die durch Abfälle gedeckt werden kann und in Kapitel 3.1.1 ermittelt wurde.

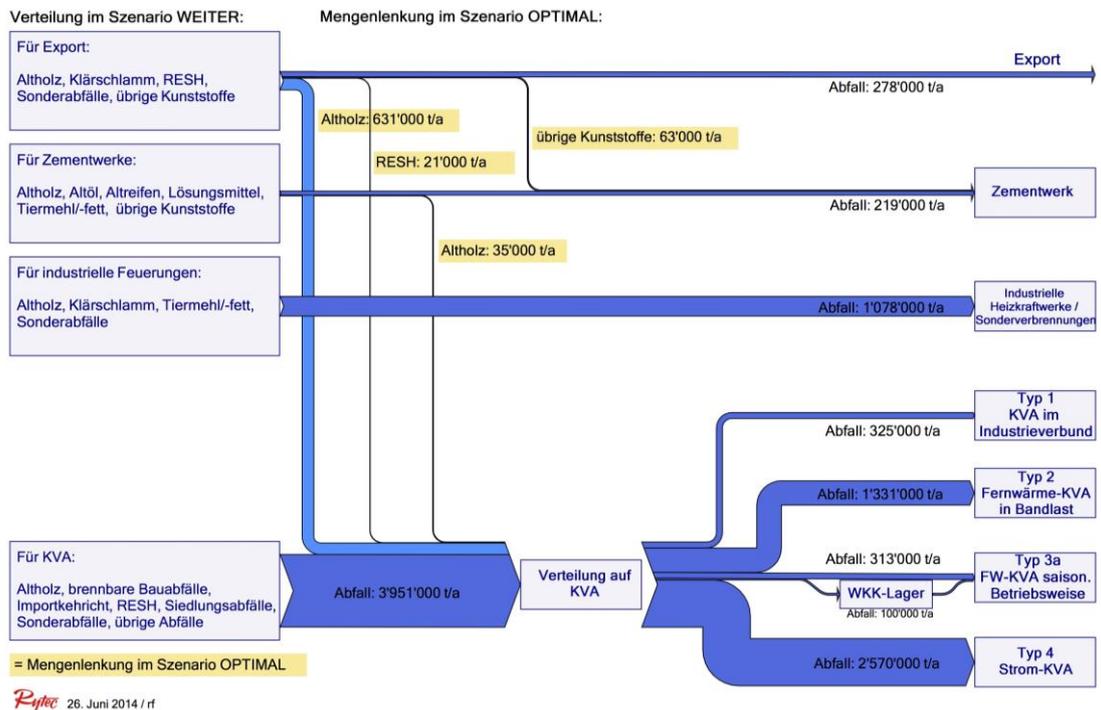
Generell wird darauf geachtet, dass die Ströme so gelenkt werden, dass möglichst unproblematische Materialien in technisch einfache (auch kleinere) Systeme gelangen. So können z.B. die Zementwerke und die industriellen Heizkraftwerke und Sonderverbrennungen hauptsächlich mit hochwertigem Altholz und (unproblematischen) Sonderabfällen versorgt werden. Der Rest wird in KVA energetisch genutzt.

Die Exporte werden auf Fraktionen beschränkt, für die es im Inland keine Verwertungs- oder Nutzungsmöglichkeiten gibt bzw. die sich natürlich ergeben (Klärschlamm in Grenzregionen etc.).

Das Resultat der Lenkung bzw. die Aufteilung auf die Verwertungsanlagen ist in untenstehender Abbildung für die optimierte Abfallwirtschaft dargestellt. Bei den KVA erfolgt eine weitere Verteilung auf die verschiedenen in Kapitel 5.2 definierten KVA-Typen.

Der Export wird stark begrenzt; Altholz und RESH werden in diesem System nicht mehr exportiert.

«Stoffstromlenkung auf die Verwertungsanlagen 2035 - optimierte Abfallwirtschaft»



Rytec

Figur 17: Resultat der Lenkung der relevanten Stoffströme auf die Verwertungsanlagen im Szenario «optimierte Abfallwirtschaft» 2035. Gelb hinterlegt die «aktiv gelenkten» Stoffströme.

Die sich daraus ergebenden Massen- und Energieflussdiagramme werden im folgenden Kapitel beschrieben.

6 Stofflich und energetisch optimierte Abfallwirtschaft

Dieses Kapitel schildert einen möglichen Zustand für 2035, ein optimiertes Gesamtbild der Schweizerischen Abfallwirtschaft, falls bis dann die Entwicklung im Energiebereich dem Szenario «Neue Energiepolitik» des Bundesrates folgt. Es zeichnet für jenen Zeitpunkt eine «ideale» Zukunft vor. Erst im Kapitel 7 «Herausforderungen und Empfehlungen» wird der Fokus auf die Umsetzbarkeit und Akzeptanz unter Berücksichtigung des heutigen Anlagenbestandes gelegt.

Wie die Transformation der optimierten Abfallwirtschaft aussehen müsste, wenn die fossilen Energien weitgehend durch erneuerbare Energien und Effizienz substituiert wurden, wird hier nicht untersucht.

6.1 Gesamtbild: ökologische Abfallbehandlung auf Energie getrimmt

Die regionale Kapazitäts- und Standortplanung für Abfallanlagen, deren nationale Koordination sowie die herausfordernden Energieeffizienzaufgaben für Abfallanlagen haben bis 2035 zu einem auf maximale Energienutzung und Ressourcenverwertung getrimmten Anlagenpark geführt. Auch findet kein Export von stofflich- und energetisch wertvollen Abfallfraktionen mehr statt, die im Inland verwertet werden können.

Für Abfälle, deren stoffliche Verwertung der thermischen Nutzung (mit anschliessender Wertstoffrückgewinnung) klar überlegen ist (ökologisch überlegen, ökonomisch vertretbar), wurden die dafür geeigneten Verwertungswege eingerichtet.

Im Zeichen einer auch zeitlich optimierten energetischen Nutzung werden die Abfallfraktionen (sofern sie dafür geeignet sind) in diejenigen Anlagen mit den höchsten Exergieeffizienz im jeweiligen Betriebszustand fliessen (siehe Kapitel 5.2: Direkte Verbrennung Zementwerk; Industrielle Heizkraftwerke/Sonderverbrennungen; KVA im Industrieverbund (Typ 1); Fernwärme-KVA in Bandlast (Typ 2); Fernwärme-KVA, saisonale Betriebsweise (Typ 3a); Strom-KVA (Typ 4).) Die Forderung nach saisonalem Betrieb der Anlagen bedeutet, dass im Sommer (wenig Wärmebedarf, Stromüberschuss) einige Anlagen den Betrieb reduzieren und den Abfall für den Winter lagern müssen.

Die Zementwerke haben 2035 dank dem Exportverbot rund 63'000 t «übrige Kunststoffe» als Ersatzbrennstoff zur Verfügung. Die Menge technisch nutzbarer Abfallersatzbrennstoffe ist damit ausgereizt und es werden zudem 35'000 t Altholz zur anderweitigen Nutzung frei. Die industriellen Heizkraftwerke und Sonderverbrennungen können bereits durch die Zunahme der Abfallmengen und durch ihre gesteigerte Anlageneffizienz die Nachfrage nach Prozessdampf, Prozess- und Fernwärme sicherstellen. Aufgrund der gesteigerten Anlageneffizienz werden im Vergleich zum Szenario «Weiter wie bisher» ca. 600'000 t Abfall weniger zur Deckung des (durch KVA deckbaren) Prozess- und Fernwärmebedarfs benötigt. 5 Bandlast-Anlagen (Typ 2) und 6 saisonale Anlagen (Typ 3a) decken jeweils in einem Fernwärmenetz die Bandlast oder einen Grossteil des Wärme-

bedarfs. Die freien Mengen Altholz aus Zementwerken, sowie die nicht mehr exportierten 21'000 Tonnen RESH und 630'000 Tonnen Altholz werden in Strom-KVA (Typ 4) oder Altholzfeuerungen (gleiche Anlageneffizienz wie Typ 4) verstromt. Insgesamt werden zusätzliche 1.4 Mio. Tonnen Abfall in Stromanlagen in 1'480 GWh Elektrizität umgewandelt (inkl. Effizienzsteigerung). Gesamthaft stehen seit dem Abfallexportverbot zusätzlich rund 3'000 GWh «Abfallenergie» in der Schweiz zur Verfügung.

Gegenüber «Weiter wie bisher» bleibt die Anzahl an industriellen KVA in etwa konstant (wenig geeignete Industriestandorte!). Die Fernwärmeanlagen in Bandlast erhalten bei gleicher Anzahl fast doppelt so viel Abfall. Die Anzahl an saisonalen Fernwärme-Anlagen halbiert sich und sie erhalten nur noch 1/3 des Abfalls. 6 saisonale Anlagen mit rund 60'000 Jahrestonnen beliefern mittlere Fernwärmenetze. Die Strom-KVA/Altholzverbrennungen konzentrieren sich an 5 Standorten (vorher 9) mit Wasserkühlung mit einer Anlagengrösse von je etwa 500'000 t/a.

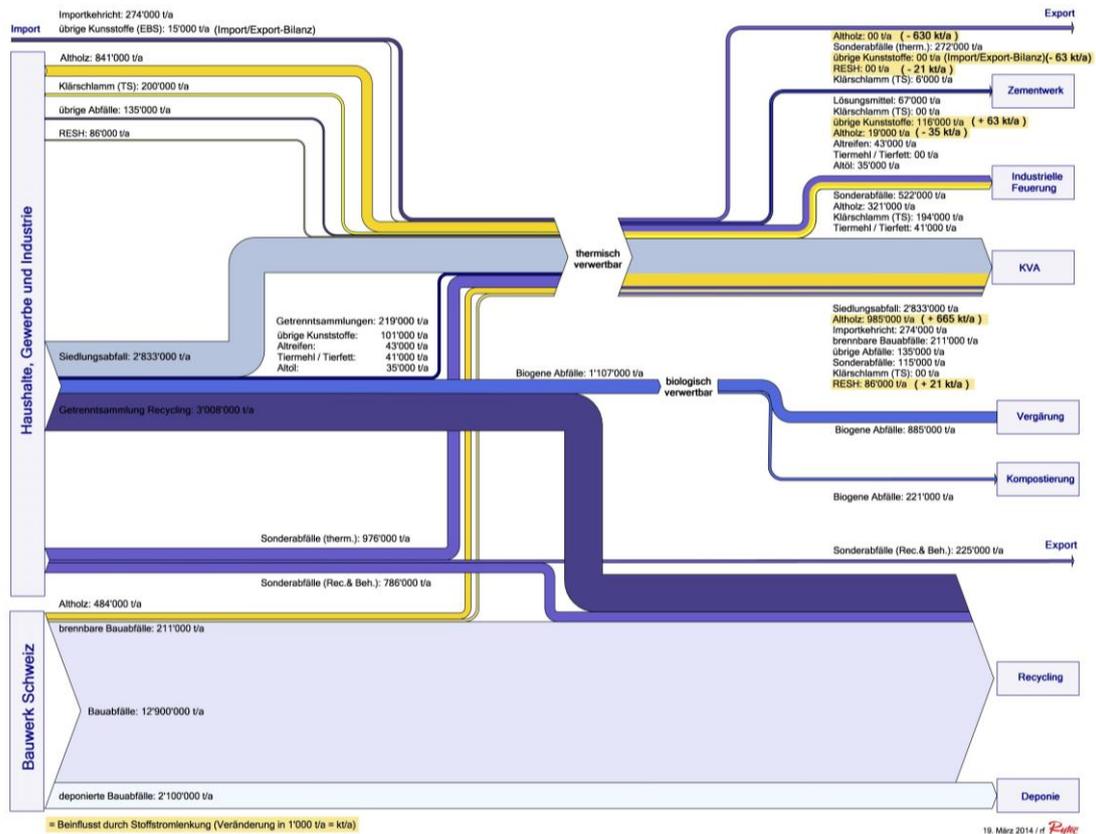
Diese Lenkung wurde durch ein geschicktes Zusammenspiel aus gesetzlichen Vorgaben (Mindesteffizienz von Anlagen) und preislichen Anreizen (für die dynamische Lenkung im Jahresverlauf) geschaffen. Die hohen CO₂-Abgaben von über 150 CHF/tCO₂ haben dazu beigetragen, die Wärmenutzung aus der Ressource Abfall zu maximieren. Die reine Verstromung ist in einer hocheffizienten Anlage exergetisch durchaus akzeptabel, ist jedoch aus CO₂-Sicht weniger attraktiv.

Schweizweit wurde bis 2035 eine schlank bewirtschaftete Logistik mit ausreichenden Lagerkapazitäten aufgebaut, um den Anlagen ohne Wärmeabsatz im Sommer zu erlauben, ihren Betrieb auf ein Minimum zu reduzieren (Vollabschaltung oder nur noch eine Verbrennungslinie) und den Abfall zu akzeptablen Bedingungen zu entsorgen. Die Kapazität des Lagers muss rund 25% der in saisonalen Fernwärme-Anlagen verarbeiteten Mengen umfassen; d.h. im aktuellen Modell nur rund 100'000 Tonnen.

Der Beitrag an die saisonale Lastverschiebung bleibt aber vergleichsweise bescheiden. Die meisten Feuerungen und Anlagen mit einem ganzjährig konstanten Wärmeabsatz laufen kontinuierlich. Nur dort, wo der Wärmebedarf im Winter hauptsächlich aus Abfallwärme bereitgestellt wird, fahren die Anlagen ihre Verbrennungsleistung den Wärmebedürfnissen nach.

In diesem System haben sich die Massenflüsse wie unten angegeben verschoben:

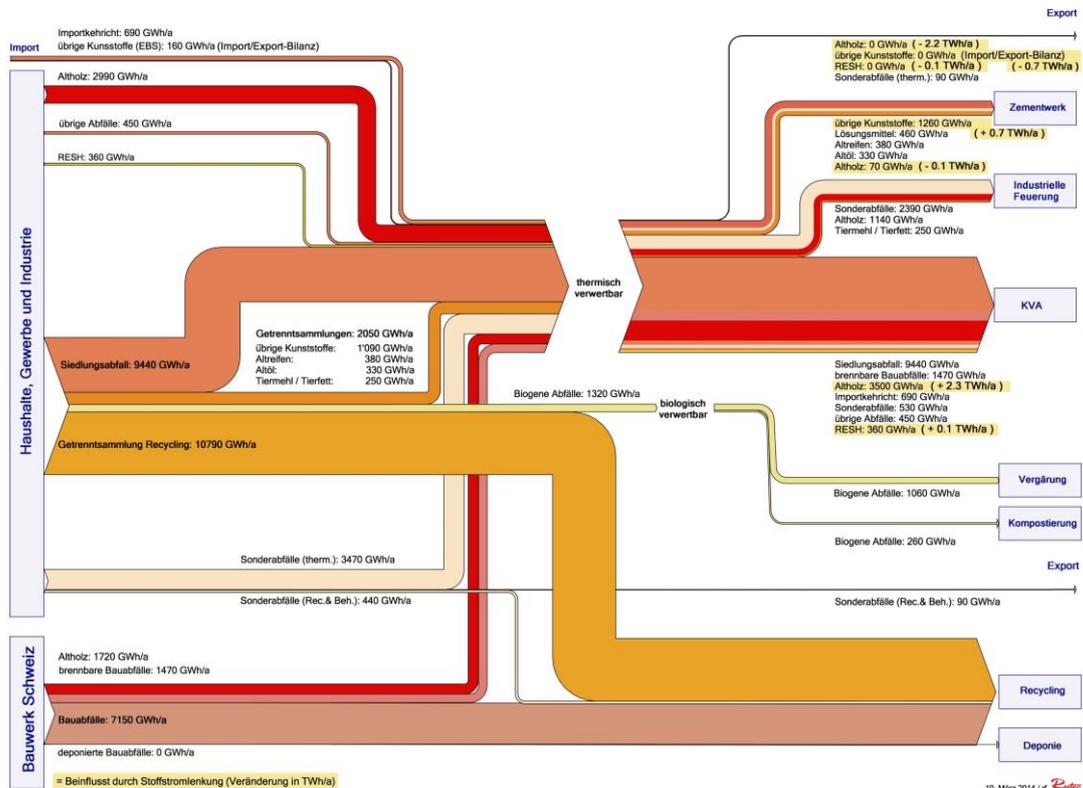
«Masseninhalte der Abfallströme 2035 – optimierte Abfallwirtschaft»



Figur 18: Massenflüsse in der optimierten Abfallwirtschaft 2035 in Tonnen pro Jahr (Eine vergrößerte Version befindet sich in Anhang A-4)

Daraus resultiert eine neue Energiesituation:

«Energieinhalt der Abfallströme 2035 – optimierte Abfallwirtschaft»



Figur 19: Energieflüsse in der optimierten Abfallwirtschaft 2035 in GWh pro Jahr (Eine vergrösserte Version befindet sich in Anhang A-5)

6.1.1 Überblick der Veränderungen im Anlagenpark

Ein solches optimiertes System beruht – neben der Schaffung der entsprechenden Rahmenbedingungen – auch auf einer Änderung im Anlagenpark der heute in der Abfallwirtschaft beteiligten Partner.

- Zementwerke** werden standardmässig eine Abwärmenutzung¹⁸ erhalten und ORC-Turbinen (oder ähnliche Technologien) zur Stromproduktion installieren. So wird die Brennstoffausnutzung weiter gesteigert. Exergetisch und vom Substitutionseffekt her stehen die Anlagen sehr gut da, da direkt fossile Brennstoffe ersetzt werden. Falls die Stoffstromlenkung nicht ausreichend «sauberen» Abfall in die Zementwerke steuern kann, müssten einzelne Anlagen ihre Rauchgasreinigung nachrüsten, falls auch höher belastete Abfälle unter Einhaltung der LRV-Werte für Abfall energetisch genutzt werden müssten.
- Weitere hocheffiziente **industrielle Heizkraftwerke** werden die heute noch meist fossile Prozesswärmeerzeugung verdrängen. Dafür müssen diese Anlagen geeignet sein, wenig belastetes Altholz zu verwerten. Mit ausreichenden Reserven in der Ab-

¹⁸ Aktuelle Beobachtung im Zementwerk Wildeggen der Jura Cement (bestehende Fernwärme und Projekt mit EKZ zur ORC-Stromproduktion) und im Zementwerk Untervaz der Holcim (ORC-Anlage)

gasbehandlung können später evtl. auch unproblematische Abfälle aus Lagerüberschüssen in den Industriefeuerungen energetisch genutzt werden.

- c. Die ebenfalls in dieser Kategorie enthaltenen **Sonderverbrennungen** (Klärschlammverbrennung, Sondermüllöfen) werden auf eine maximale Wärmelieferung an industrielle Prozesse hin optimiert. Dabei muss gleichzeitig sichergestellt sein, dass die ökologischen Anforderungen erfüllt und die Betriebssicherheit gewährleistet wird.
- d. Die **KVA im Industrieverbund mit direkter Prozessdampfabgabe (Typ 1)** sind Energiedienstleister in Industriegebieten mit hohem Wärmebedarf. Diese Anlagen laufen das ganze Jahr auf voller Last (d.h. sie benötigen eine ganzjährige Sättigung mit Abfall) zur Befriedigung des Dampfbedarfs in der Industrie (nachdem auch dort konsequent optimiert wurde). Ihre Stromproduktion verläuft parallel zur Wärmeabgabe und ist ein nicht-steuerbares, dafür relativ gut planbares Nebenprodukt. Es gibt nur 3-4 solche Anlagen.
- e. **KVA in grossen Fernwärmenetzen (Typ 2)** sichern die Grundlast des Fernwärmebedarfs. Sie kommen in Netzen ab 300 GWh Wärmebedarf zur Anwendung. Sie werden im Sommer auf Nennlast betrieben und fahren im Winter eine kontrollierte Überlast. In sehr grossen Netzen kann es sinnvoll sein, zusätzliche Verbrennungslinien nur in einem Winterbetrieb zur Verfügung zu halten (falls der Abfall dafür verfügbar ist). Allerdings werden gerade in solchen Netzen auch Holzheizkraftwerke aufgebaut, die vom Abfall «konkurrenziert» würden und dementsprechend weniger Betriebsstunden hätten. Es gibt 2035 nur 5 FW-Netze, die ausreichend gross sind für je eine solche Anlage.
- f. In kleineren Fernwärmenetzen ab 100 GWh Wärmebedarf fahren **KVA mit saisonaler Betriebsweise (Typ 3a)**. Sie liefern im Winter die Wärme ins Netz, müssen bei (abfallmässiger) Vollauslastung im Sommer die Abfallwärme jedoch (relativ ineffizient) verstromen. Diese Anlagen werden auf saisonalen Betrieb umgerüstet. So soll im Winter die Anlage in einer moderaten Überlast fahren (120%); im Sommer wird der Verbrennungsbetrieb soweit reduziert, wie der Anfall nicht-lagerbarer Abfälle das zulässt (z.B. bei 2-Linien-Anlage: Abschaltung einer Linie, Betrieb der anderen mit 80% Last = 40% der Nennkapazität). Durch diese Fahrweise können sie bis zu 80% des Wärmebedarfes im Netz decken. Damit kann der Sommerabfall für den Winter gespart werden. Dafür sind Lagerkapazitäten von ca. 25% der Jahresmenge vorzusehen (vgl. Anhang A-12). Wir rechnen mit 6 solchen Anlagen in 2035.
- g. **KVA mit hoher Stromeffizienz (Typ 4)** aber ohne Wärmeabgabe sind die «Joker-Anlagen» im Anlagenpark. Sie sind als Kraftwerke in sich optimiert und versuchen, den schwierigen Brennstoff «Abfall» so effizient wie möglich auszunutzen. Damit sie ihr Effizienzpotential voll ausschöpfen können, fahren auch diese Anlagen eine Bandlast, denn eine flexible Fahrweise analog einer GuD-Standby-Anlage wäre betrieblich kaum beherrschbar (Betriebsstunden? Anfahrzeiten? Auslastung des Personals?). Dieser Anlagentypus muss dem Vergleich mit entsprechenden konventionellen Kraftwerken standhalten. Es kommen daher nur Standorte mit guten Rückkühlmöglichkeiten

ten (Flusskühlung¹⁹) in Frage, um die höchstmögliche Verstromungseffizienz erzielen zu können. Pro Standort würden rund 130 MW Rückkühlleistung benötigt. In Anbetracht der wegfallenden Kernkraftwerke und deren Wärmeeintrag in die Flüsse (Mühleberg, Beznau) sollte dies ökologisch keinen Rückschritt bedeuten. Sobald grosse Altholzmengen zur Verfügung stehen, können auch entsprechende Anlagen für die Altholzverstromung vorgesehen werden. Hier ist fraglich, ob trotz der guten Lagerbarkeit des Altholzes ein Bandlastbetrieb angenommen werden soll oder sich eine Auslegung auf eine forcierte Winterstromproduktion über die Energiepreise lohnen könnte. Wir rechnen mit 5 grossen Anlagen von diesem Typ (je ca. 500'000 t/a).

6.1.2 Neue Verwertungspfade

Die energieoptimierte Abfallwirtschaft basiert auf neuen Verwertungswegen. Die hauptsächlichsten Neuerungen sind:

Geeignete Brennstoffe für die industriellen Prozessdampferzeuger (Altholz und definierte Abfallqualitäten aus Industrie + Gewerbe) werden direkt abgegriffen oder über eine EBS (Ersatzbrennstoff)-Aufbereitung aus dem «Abfallsystem» ausgeschleust. Die Anlagen werden verpflichtet, bezüglich Rauchgaswerten und Rückstandsqualitäten die Grenzwerte der Abfallgesetzgebung zu erreichen.

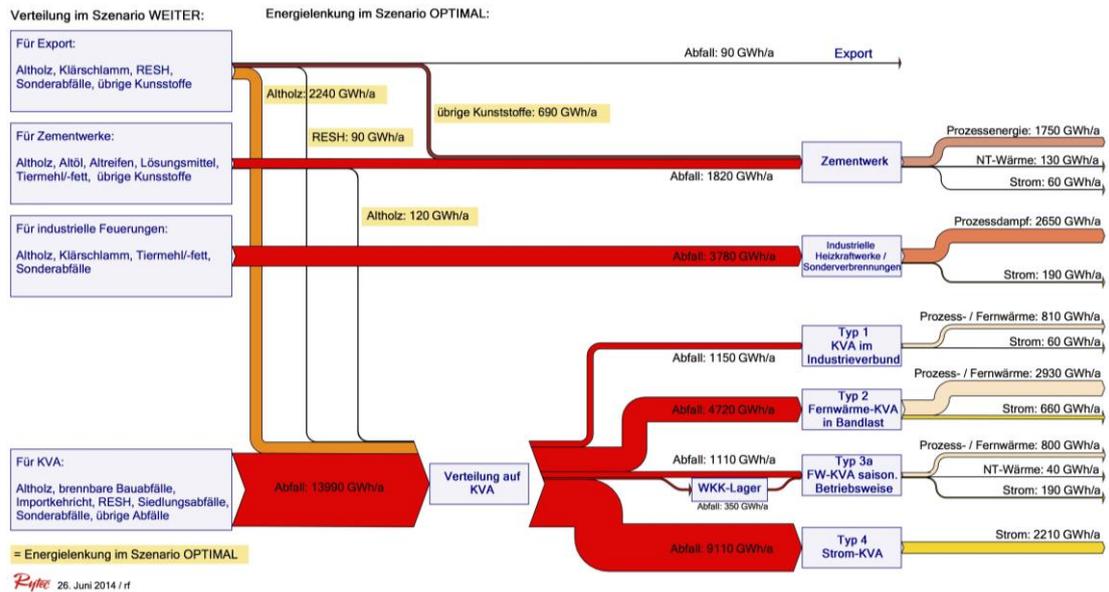
Inländische Verwertung der Altholzströme: Grundsätzlich wird Altholz für die Substitution von fossilen Energien zur Prozesswärmeproduktion (teilweise auch zur CO₂-neutralen Stromproduktion) benötigt. Altholzexporte werden nicht mehr erlaubt. Die energetische Nutzung wird in diesem Fall der stofflichen vorgezogen. (In der Schweiz besteht bezüglich Holz keine Knappheit, die Substitution fossiler Brennstoffe ist als höherwertig einzustufen.)

Aufbau geeigneter Lagerstätten für Altholz, trockene Gewerbe- und Siedlungsabfälle um die relativ konstant anfallenden Mengen in ein wärmegeführtes Regime (vor allem für saisonale Fernwärme- und Stromanlagen) überführen zu können. Der Betrieb dieser Lagerstätten wird zusätzliche Kosten in der Abfallwirtschaft verursachen (vgl. Anhang A-12). Er kann nur gerechtfertigt werden, wenn entsprechend höhere Energieerlöse generiert werden können. Die Betreiber der Abfalllager profitieren von den unterschiedlichen Anlieferbedingungen für Abfälle im Sommer bzw. im Winter. Sie können kurzfristige Fehlmengen ausgleichen.

Die Zuordnung der Abfallarten und –mengen auf die verschiedenen Anlagentypen zeigt die untenstehende Abbildung:

¹⁹ Beispiele von Anlagen, die heute schon mit Flusskühlung arbeiten: KEBAG, KVA Turgi. Beispiele von Anlagen, bei denen eine Flusskühlung denkbar wäre: KVA Thun, SATOM, UTO VS, KVA Genf, Buchs SG, Trimmis

«Energienlenkung auf die Verwertungsanlagen 2035 - optimierte Abfallwirtschaft»



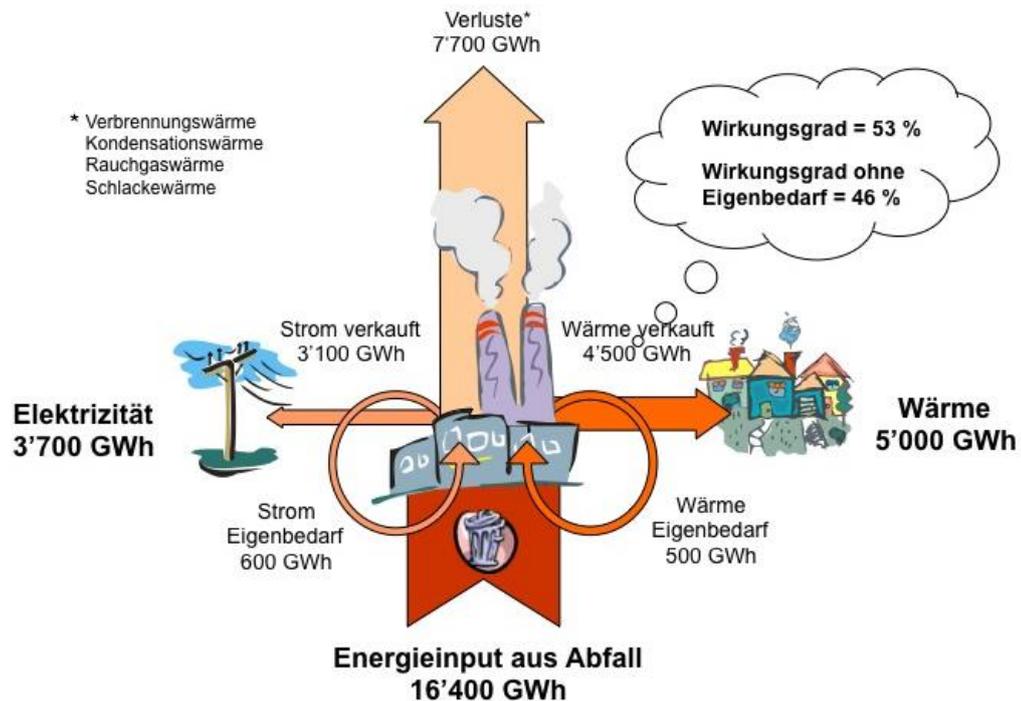
Rytec

Figur 20: Zuordnung der Energieflüsse auf die Anlagentypen in der optimierten Abfallwirtschaft 2035 (siehe Anhang A-14 für die Gesamtdaten)

Nach der Befriedigung des industriellen Wärmebedarfs (Zementwerke, Industriefeuerungen und KVA im Industrieverbund (Typ 1)) werden die Restmengen an Abfällen auf die Fernwärmanlagen verteilt. Die relativ teuren saisonalen Anlagen können nur in einigen wenigen Fernwärmenetzen effizient eingesetzt werden.

Daraus resultiert folgendes Gesamtbild für die Energienutzung in den Schweizer KVA in einer optimierten Abfallwirtschaft im Jahr 2035.

«Energiefluss der Schweizer KVA 2035 – optimierte Abfallwirtschaft»



BAFU modifiziert

Figur 21: Auswirkungen der Stoffstromlenkung im Szenario «optimierte Abfallwirtschaft» auf den Energiefluss der Schweizer KVA im Jahr 2035.

Der Wirkungsgrad (ohne Eigenbedarf) beträgt in der optimierten Abfallwirtschaft im Schnitt über den gesamten Anlagenpark bei der Elektrizität 19% und der Wärme 27%.

6.1.3 Diskussion der Sensitivität des Szenarios «optimierte Abfallwirtschaft»

Zentral für das Modell ist auf der Nachfrageseite die Annahme, dass lediglich 30% des Prozessdampf- und Prozesswärmebedarfs durch Abfall gedeckt werden kann²⁰. Falls dieser Anteil nur schon um 10% unterschätzt wurde, also 40% des industriellen Wärmebedarfes durch abfallstämmige Brennstoffe gedeckt werden könnten, so hat dies grosse Konsequenzen auf die Stoffstromlenkung für das Szenario «optimierte Abfallwirtschaft». Den industriellen Heizkraftwerken und industriellen KVA könnte mehr Abfall zugewiesen und dieser dadurch energieeffizienter genutzt werden. Damit würde sich der Altholzstrom in die Strom-KVA (Typ 4) reduzieren und es würde eine höhere Substitutionswirkung erzielt.

Der exergetische Vorsprung der Prozessdampf- / Fernwärme-KVA gegenüber den anderen KVA-Typen schmilzt dahin, wenn die Anlagen ihre Wärme nicht über 8000 Stunden vollständig als Bandenergie abgeben können und in Richtung saisonaler Fernwärme-Anlagen ausgelegt werden müssen. Sobald die Vollbetriebsstunden einer Fernwärmeanlage unter 7250 Stunden fallen, wäre eine effiziente Anlage Typ 4 exergetisch besser.

²⁰ Dies entspricht einer Anzahl von 50-100 Unternehmen mit einem durchschnittlichen Wärmebedarf von 50 bis hinunter auf 2 MW. Die 30% entsprechen etwa einem Anlagenpark von gut 30 industriellen Heizkraftwerken, 3-4 KVA für Prozesswärmeherstellung und 11 KVA in jeweils einem Fernwärmenetz unter der Annahme, dass sich pro Anlage 1-4 Betriebe anschliessen lassen.

6.2 Massnahmenbündel zur Erreichung der optimierten Abfallwirtschaft

Im Folgenden werden die im Kapitel 6 beschriebenen Handlungsoptionen in Massnahmenpakete kombiniert. Die bereits in einer früheren Projektphase von der Begleitgruppe als wenig erfolgsversprechend beurteilten Massnahmen und einige tiefer bewertete Massnahmen werden hier nicht mehr aufgeführt²¹.

6.2.1 Massnahmen zur Lenkung der Abfallströme

Die Kantone koordinieren ihre Abfallplanung mit Unterstützung des Bundes (SV01). Neben den regionalen Verhältnissen im Abfallaufkommen werden auch die grössten Energiebezüger und bestehende Energiepläne der Standortgemeinden in die Planung einbezogen. Das Ziel soll es sein, die Abfälle als Energieträger dorthin zu bringen, wo der energetische Nutzen maximiert werden kann. Die dadurch benötigten Abfalltransporte fallen bis zu einem Radius von rund 50 km ökologisch kaum ins Gewicht. Die gesamtheitliche Betrachtungsweise ist wichtig, damit Abfallmengen eher ausgetauscht als an bestehenden Anlagen vorbeigefahren werden (Situation KVA Trimmis → Abfälle Oberengadin fahren bis Niederurnen weiter). Damit wird eine Grundlage geschaffen, um Überschüsse oder Defizite in der schweizerischen «Abfallbilanz» sauber feststellen zu können und entsprechende Exportbeschränkungen oder Importerleichterungen für die energiereichen Abfallströme vorsehen zu können (SG01, SG02). Eine solche Planung stellt auch sicher, dass im Gesamtsystem ausreichende Reserven bestehen. Gerade mit einer saisonalen Betriebsweise gewisser Anlagen öffnen sich Möglichkeiten für einen unproblematischen Ausgleichsbetrieb (z.B. im Sommer doch verwerten statt die Lager zu überfüllen, im Winter ins Lager steuern). Überkapazitäten sollten also nicht zwingend beschränkt, sondern der gemeinsamen Bewirtschaftung geöffnet werden (AZ04). Dafür können finanzielle Ausgleichszahlungen sinnvoll sein (wird seit 2012 bereits in einigen Anlagenverbänden praktiziert).

Im regionalen Kontext sollte die Abfallwirtschaft vermehrt das Konzept regionaler Annahmезentren (KVA TG: RAZ) anbieten und nicht von jedem Sammelfahrzeug verlangen, bis zur nächstgelegenen KVA zu fahren (SZ03). Damit entsteht einerseits eine Möglichkeit, die Verwertungswege nach dem RAZ flexibler zu gestalten (Welche Anlage braucht dringend Energie? Welches Lager sollte gefüllt werden?) und andererseits können die sehr ineffizienten Fahrten mit den typischerweise nur mit ca. 6-7t beladenen Sammelfahrzeugen (und teils mit 3 Mann Besatzung) eingeschränkt werden. Den höheren Kosten durch den Umlad stehen tiefere Sammelaufwendungen entgegen.

Einzelmassnahmen:

- SV01 National koordinierte, regionale Planung
- SZ03 Umladestationen
- SG01 Import / Export aus Energiesicht steuern

²¹ Durch Begleitgruppe gestrichene Handlungsoptionen: SV05, SZ02, SZ05, AT07, AT08, AO03, NZ02, ZZ03; Wegen ungewisser Wirkung nicht weiterverfolgt: SV06, SV07, AZ05, NZ03, NO02, ZZ01

- SG02 Exporte von energiereichen Abfällen regulieren
- AZ04 Überkapazitäten / Reserven bewirtschaften

6.2.2 Massnahmenbündel «Zementwerke»

Obwohl Zementwerke nicht als Abfallanlagen zu betrachten sind, sind für die Erreichung energetisch optimaler Nutzungswege auch auf diesem Anlagentyp gewisse Anpassungen notwendig. So wird davon ausgegangen, dass die Anlagen mit ORC-Modulen zur Stromproduktion aus Abwärme ausgerüstet werden und auch weitere (moderate) Abwärmennutzungsmaßnahmen realisiert werden. So wird eine Stromproduktion von 2.5% des Energieinputs aus Abfall vorausgesetzt und auch 5% Abwärmennutzung (auf rund 50°C). Um auch weitere hochkalorische und trockene Abfallströme in den Zementwerken verwerten zu können, erzielen diese Verbesserungen in den Rauchgasreinigungssystemen, um analog den anderen Abfallanlagen geltende Grenzwerte einhalten zu können.

6.2.3 Massnahmenbündel «Industrielle Heizkraftwerke / Sonderverbrennungen»

Bestehende und neue Industriefeuerungen richten auch eine effiziente Stromproduktion ein (AT06). Die Investitionskosten für diese Stromproduktion (meist kleine Gegendruck- oder, bei stark schwankendem Dampfbedarf, Kondensationsturbinen) betragen rund 3'000 CHF/kWel. In den nachgeschalteten industriellen Energienutzungen wird dank Energieeffizienz-Massnahmen die Energie exergetisch optimal genutzt. Das Ziel muss es sein, keine hochwertigen Abfälle für ineffiziente industrielle Prozesse zu verbrauchen.

Als Brennstoffe für diese Anlagen können neben den nicht-exportierten Altholzmengen (SG01, SG02) auch Ersatzbrennstoffe ausgeschieden werden (SV03). Dies kann durch eine energiebasierte Abfalltrennung (SV04) stark erleichtert werden. Eine «trockene Abfallfraktion» kann relativ gut sortiert, gut gelagert und auch effizient transportiert werden. So wird die Kaskade der stofflichen Nutzung und der effizienten Energiebereitstellung stark vereinfacht²². Dabei wird die «feuchte Abfallfraktion» noch eine leichte Steigerung an vergärbarem Primärmaterial bedeuten. Ob die Gärreste landwirtschaftlich verwertet werden können oder verbrannt werden müssen, wird sich bis 2035 geklärt haben.

Einzelmassnahmen:

- SV03 Ersatzbrennstoffe
- SV04 Energiefokus in der Abfalltrennung
- AT06 Stromproduktion in industriellen Heizkraftwerken steigern

6.2.4 Massnahmenbündel «KVA im Industrieverbund (Typ 1)»

Abfallverbrennungsanlagen turbinieren als Prozessdampfanlagen den industriell benötigten Dampf nur bis auf die benötigten Dampfparameter. Die für die Industrie gut gelegenen Anlagen (AO01) werden in (teils neu errichtete) Industriecluster für energieintensive

²² Entsprechende Systeme bestehen in Frankreich: www.sydeme.fr

Betriebe (NO01) integriert. Kosten entstehen durch Umsiedelung der Industriebetriebe und Vergrösserung der KVA bei Bedarf. Die Kosten für die Errichtung von Ferndampfleitungen zur Erschliessung sind im Bereich von 2-3 Mio. CHF/km. Die konsequente Förderung von Industrieansiedelungen mit Energieargumenten muss zwischen der lokalen Wirtschaftsförderung und den Abfallbetrieben abgeglichen werden (vorstellbar wären kombinierte Angebote: Arealpreis, Energiepreis, Steuervorteile).

Einzelmassnahmen:

- AO01 Zentrale grosse Anlagen
- NO01 Industriecluster für energieintensive Betriebe

6.2.5 Massnahmenbündel «Fernwärme-KVA in Bandlast (Typ 2)»

Die grossen Fernwärmenetze in der Schweiz sind teilweise schon sehr alt und haben einen Modernisierungsbedarf. Hier müssen gleichzeitig auch entsprechende Optimierungen (hydraulisch und wärmetechnisch) erfolgen (NZ01), damit die Wärmebereitstellung auf möglichst tiefem Niveau erfolgen kann (= tiefe Rücklauftemperaturen, variable Vorlauftemperaturen, zeitgemässe Regelsysteme in den Hausstationen der Bezüger). Dank Rücklauftemperaturen zwischen 40-60°C können auch bisher ungenutzte Wärmepotentiale in der Abfallverwertung (AT04 - latente Wärme im Rauchgas) für die Rücklaufanhebung verwendet werden. Die Errichtung von grossen Wärmespeichern (einige 10'000 m3) erlaubt es, in diesen grossen Netzen die tageszeitlich bedingten Spitzen aus dem Speicher statt mit zusätzlichen Produktionsanlagen zu versorgen.

Einzelmassnahmen:

- AT04 Nutzung latente Wärme im Rauchgas
- AZ01 Wärmespeicher aufbauen
- NZ01 Optimierungen in Fernwärmenetzen

6.2.6 Massnahmenbündel «Fernwärme-KVA, saisonale Betriebsweise (Typ 3a)»

Für KVA, die ihre Wärme nicht ganzjährig vollständig abgeben, müssen relativ teure technische Vorkehrungen getroffen werden, damit sie von der Energieausnutzung her den zukünftigen Kriterien genügen können. So sollte eine möglichst dynamische Fahrweise der Anlage angestrebt werden (SV02), um hauptsächlich dem Wärmebedarf nachfahren zu können. In den Zeiten der Stromproduktion muss sichergestellt werden, dass die entstehende Tieftemperatur-Abwärme (wenn mit Luftkondensatoren gekühlt wird (AT05)) für Anergienutzungen bereitgestellt werden kann. Dafür müssen entsprechende Netze aufgebaut werden (NT01). Hier stellt sich die Schwierigkeit, dass auch solche Tieftemperatur-Energienutzungen (Fischzucht, Gewächshaus - NT02) ihre Bezugsspitzen im Winter und nicht im Sommer haben werden. Die Kälteproduktion aus Wärme ist möglich. Effiziente Anwendungsfälle solcher Adsorptionskühlanlagen beziehen jedoch Wärme auf relativ hohem Niveau (rund 120-160°C) und erzeugen selbst wieder grosse Abwärmeströme, die über Rückkühlanlagen «entwertet» werden müssen.

Durch die dynamische Fahrweise kann dieser Anlagentypus in Schwachlastzeiten die Verbrennung stark reduzieren und damit die Abfalllager (SZ01) füllen. Der Austausch von Mengen mit anderen flexiblen Anlagen (auch industriellen Heizkraftwerken oder KVA im Bandlastbetrieb bei drohender Unterauslastung) ist ein neues Geschäftsmodell dieser Stoffstrom-Drehscheiben (SZ04).

Vorstellbar wären auch sehr kleine, dezentrale Anlagen zur Wärmebereitstellung und Stromproduktion (AO02). Leider gibt es noch keine (seriösen) Anbieter solcher Kleinanlagen, die sämtliche Vorgaben bezüglich Umweltaforderungen und Betriebssicherheit erfüllen könnten.

Anlagen dieser Art können sich für Lastverschiebungsaufgaben im Stromnetz (tageszeitlicher Ausgleich von Schwankungen) mit einer flexiblen Fahrweise und einer darauf optimierten Turbine spezialisieren (AZ02/03). Damit die hohe Energieausnutzung gewährleistet werden kann, müssen Speichersysteme (z.B. Heisswasserspeicher – AZ01) die Dampfmengenüberschüsse aufnehmen oder Knappheiten ausgleichen können.

Einzelmassnahmen:

- SZ01 Abfalllager
- SV02 Dynamische Zuordnung
- SZ04 Ausgleich unter flexiblen Anlagen
- AT05 LuKo-Abwärme für Anergienutzungen
- AO02 Dezentrale kleine Anlagen
- AZ02/03 Dampfproduktion flexibilisieren und Turbine
- NT01 Anergienetze aufbauen
- NT02 Tieftemperatur-Energienutzung (Fischzucht, Gewächshaus)

6.2.7 Massnahmenbündel «Strom-KVA (Typ 4)»

Wenn die Abfallenergie für die Stromproduktion genutzt werden soll, müssen diese Anlagen sehr konsequent auf ihre Fahrweise als Kraftwerk optimiert werden. So wird statt einer Luft- eine Wasserkühlung benötigt (AT02), die Dampfparameter des Frischdampfes werden erhöht (im vollen Bewusstsein, dass damit Korrosionserscheinungen an exponierten Bauteilen entstehen) und die Kondensatvorwärmung/Speisewassererwärmung wird mehrstufig ausgelegt.

Da das Modell grosse Altholzmengen für diesen Anlagentyp vorsieht, können eventuell spezialisierte Altholzkraftwerke aufgebaut werden, in denen die Dampfparameter für eine gesteigerte Stromeffizienz erhöht werden können.

Einzelmassnahmen:

- AT02 Flusswasserkühlung
- Neu: Erhöhung der Dampfparameter
- Neu: Mehrstufige Kondensat / Speisewassererwärmung

6.2.8 Massnahmenbündel «Rahmenbedingungen»

Mit einigen gesetzgeberischen Präzisierungen der Rahmenbedingungen in der Abfallwirtschaft kann eine grosse Wirkung erzielt werden. Insbesondere müssen für Abfallanlagen Mindestanforderungen an die Netto-Energieabgabe gestellt werden (AO04, ZZ02). Die Klärung der Kostenträger zwischen der Entsorgungsfunktion und der Energiebereitstellung aus Abfall wird dank der grösseren Transparenz die Quersubventionierung zwischen den Bereichen soweit verhindern, dass sichergestellt werden kann, dass mit hohen Abfallgebühren nicht die Energie verbilligt wird.

Einzelmassnahmen:

- AO04 Energetische Mindestanforderungen aufstellen
- ZZ02 Effizienzvorgaben für Vergärungsanlagen
- ZZ04 Trennung der Energie- und Abfallrechnung

6.2.9 Allgemeine Massnahmen

An diversen Standorten können nach einer Überprüfung der Umweltleistung der bestehenden Anlagen, den heutigen Immissions- und Emissionsverhältnisse in der Umgebung die Umweltauflagen gesenkt werden, die eine effizientere Energienutzung verunmöglichen. Insbesondere sind dies flexiblere Anforderungen an die Rauchgastemperaturen am Kamin (beschränkt auf gewisse Wetterlagen, aktualisierte Ausbreitungsrechnung mit Schadwirkung der verbleibenden Reingasbestandteile). Durch Bund und Kanton werden die Standortgemeinden darin beraten, wie eine ökologisch unbedenkliche Anpassung der Auflagen gestaltet werden kann.

In praktisch allen Anlagen der Abfallwirtschaft hat der Eigenenergiebedarf der Anlage einen starken Effekt auf die Nettoproduktion. Sowohl bei KVA, Altholzaufbereitungen wie auch Vergärungsanlagen müssen Prozessspezialisten die Verfahrenstechnik mit klassischen Betriebsoptimierungsansätzen hinterfragen und einen Massnahmenplan erarbeiten für die Herstellung eines optimierten Zustandes. Diese Fachleute gibt es kaum. Sie sind meist mit dem Bau neuer Anlagen beschäftigt und können sich nicht um die Optimierung bestehender Anlagen kümmern. Hier gilt es, entsprechende Spezialisten auszubilden, sie mit einer hohen Glaubwürdigkeit und gutem Prozesswissen auszustatten. Idealerweise könnten sich Gruppen von Anlagen einen eigenen «Energieoptimierer» anstellen (z.B. VtV, ZAV etc.).

Einzelmassnahmen:

- AT01 Prüfung Umweltauflagen
- AT03 Konsequente Optimierung Eigenbedarf

6.3 Auswirkungen

Die optimierte Abfallwirtschaft, wie sie in Kapitel 6.1 beschrieben wurde, wird nun bezüglich der energetischen Wirkung, den Auswirkungen auf die Infrastrukturen und die damit

verbundenen Investitionskosten, deren Wirtschaftlichkeit sowie den Auswirkungen auf die Umwelt beurteilt. Die Beschreibung und Quantifizierung der Auswirkungen bezieht sich auf den Vergleich des Szenarios «optimierte Abfallwirtschaft» mit dem Referenzszenario «Weiter wie bisher», jeweils mit dem Zeithorizont 2035.

Die Auswirkungen der optimierten Abfallwirtschaft werden anhand der folgenden Beurteilungskriterien bewertet:

Kriterien	Einheit
Energetische Wirkung	
Elektrizitätsproduktion	GWh
Wärmeproduktion	GWh
Flexibilität Strom-/Wärmeproduktion	Qualitative Beurteilung
Anteil Winterstrom	GWh
Elektrische Leistung	MW
Regelleistung	MW
Umwelt	
Treibhausgasemissionen	Quantitative Beurteilung
Umweltauswirkungen	Qualitative Beurteilung
Kosten und Wirtschaftlichkeit	
Investitionskosten	CHF
Wirtschaftlichkeit	Qualitative/quantitative Beurteilung

Tabelle 11: Beurteilungskriterien zur Bewertung der optimierten Abfallwirtschaft

6.3.1 Energetische Wirkung

In der Gesamtsumme können dank einer optimierten Abfallwirtschaft rund 12'850 GWh Energie aus der Abfallverwertung genutzt werden, im Vergleich zu 10'750 GWh im Szenario «Weiter wie bisher». In einer exergetischen Betrachtung, welche die Wertigkeiten der verschiedenen Energieformen berücksichtigt, entspricht dies rund 7'000 GWh im Vergleich zu 5'100 GWh, also ein Gewinn von rund 1'900 GWh Exergie. Die grössten Gewinne liegen in der erhöhten Prozessenergienutzung – einerseits durch die Nutzung von Abfällen in Zementwerken, andererseits durch die Prozessdampferzeugung für industrielle Anwendungen – sowie in der verstärkten Elektrizitätsproduktion. Ein wesentlicher Beitrag zur erhöhten Elektrizitätsproduktion leistet die Massnahme der Exportbeschränkung, dank welcher v.a. Altholz auf inländische Strom-KVA umgelenkt wird.

Die nachfolgende Tabelle enthält eine Beurteilung des Gesamtbilds der optimierten Abfallwirtschaft und eine Beurteilung einzelner Aspekte anhand der festgelegten energie-spezifischen Kriterien.

Energetische Wirkung des Szenarios «optimierte Abfallwirtschaft»			
	Auswirkungen gegenüber «Weiter wie bisher»	Quantitativer Vergleich zu «Weiter wie bisher»	Quantitativer Vergleich zum Ist-Zustand 2012
Gesamtbeurteilung	Der gesamte Energiegewinn aus der Abfallverwertung nimmt im Vergleich zum Szenario «Weiter wie bisher» um 20% zu. Exergetisch betrachtet beträgt die Zunahme sogar 36%.	energetisch: +2'100 GWh exergetisch: +1'900 GWh	energetisch: + 5'100 GWh exergetisch: + 3'200 GWh
Beurteilungskriterien			
Elektrizitätsproduktion	Die gesamte Elektrizitätsproduktion kann um 59% gesteigert werden. Den grössten Beitrag dazu leisten die KVA des Typs 4 «Stromanlagen».	en./ex.: +1'300 GWh	en./ex.: + 1'900GWh
Wärmeproduktion	Die Nutzung von Prozessenergie in Zementwerken nimmt um 30% zu, Prozessdampferzeugung in industriellen Heizkraftwerken und KVA kann um 19% gesteigert werden und Fernwärme nimmt um 12% zu. Die Nutzung von Niedertemperaturwärme hingegen nimmt um 3/4 ab. Die Energiemenge der Wärmeproduktion steigt in der Summe somit um lediglich knapp 10%; exergetisch betrachtet beträgt der Anstieg jedoch 17%. Dies liegt insbesondere daran, dass ein Teil der Energie anstatt als Niedertemperaturwärme in Energieformen mit höherer Wertigkeit genutzt werden kann.	energetisch: +800 GWh exergetisch: +600 GWh	energetisch: +3'100 GWh exergetisch: +1'200 GWh
Flexibilität Strom-/Wärmeproduktion	Bei der Produktion von Wärmeenergie besteht relativ wenig Flexibilität, da der grösste Anteil in Anlagen mit ganzjährig konstanter Produktion erzeugt wird. Diese sind wärme gesteuert und produzieren Strom nur als Nebenprodukt. Die Flexibilität bei der Stromerzeugung erhöht sich jedoch dank den KVA Typ 4 (Stromanlagen), die zwar als Bandlastanlagen betrieben werden, mit geeigneten Speichersystemen jedoch eine im Tagesverlauf variable Stromproduktion (+/- 20%) sicherstellen können. Die Zahl der Anlagen, die flexibel zwischen Strom- und Wärmeproduktion wechseln können, nimmt jedoch ab, da saisonale Fernwärme-Anlagen zugunsten einer verstärkten Spezialisierung der Anlagen umgenutzt werden.	qualitative Beurteilung: Bedingt flexibel	qualitative Beurteilung: Bedingt flexibel
Anteil Winterstrom	Durch die Erhöhung der ganzjährigen erneuerbaren Stromproduktion erhöht sich der Beitrag der Abfallwirtschaft an die Deckung der Winterspitzen, insbesondere dank den KVA Typ Stromanlage. Die Menge an Winterstrom steigt um rund 700 GWh gegenüber «Weiter wie bisher». Der Anteil des Winterstroms an der gesamten Stromproduktion kann allerdings nur leicht gesteigert werden und bewegt sich weiterhin um 50%. Dazu tragen die saisonalen Fernwärme-Anlagen bei, welche eine saisonale Verschiebung der Stromerzeugung erlauben.	en./ex.: + 700 GWh	en./ex.: + 1'000 GWh
Elektrische Leistung	Die gesamte elektrische Leistung des Anlagenparks verdoppelt sich gegenüber dem Szenario «Weiter wie bisher»	+ 300 MW	+ 400 MW
Regelleistung	Die Regelleistung der Abfallwirtschaft kann gegenüber «Weiter wie bisher» um einen Faktor 3 gesteigert werden. Neue Wärmespeicher stellen sicher, dass die erforderliche Regelenergie nicht dazu führt, dass grosse Energiemengen ungenutzt verloren gehen. Falls die Energiepreise die sehr teure saisonale Betriebsweise der Strom-KVA (Typ 4) ermöglichen würden, könnte substantiell mehr Regelleistung angeboten werden. Beim heutigen Bedarf von rund 400 MW scheint dies unsinnig. Wie sich der Bedarf 2035 darstellen wird, ist den Energieperspektiven nicht zu entnehmen.	+ 280 MW	+ 400 MW

Tabelle 12: Beschreibung und Quantifizierung der energetischen Auswirkungen der optimierten Abfallwirtschaft im Vergleich zum Referenzszenario «Weiter wie bisher» (Abkürzungen: en. = energetisch; ex. = exergetisch)

Es ist jedoch nicht nur die Wirkung des Gesamtmodells von Interesse, sondern auch die Wirkung der einzelnen in Kapitel 6.2 beschriebenen Massnahmenbündel. Diese Beurteilung dient auch als Grundlage für die spätere Formulierung von Empfehlungen zur Umsetzung der Massnahmen.

Die optimierte Abfallwirtschaft basiert auf drei Haupttypen von Massnahmen. Zum einen werden die Stoffströme bedarfsgerechter gelenkt; zum andern die Anlagen betrieblich verbessert (d.h. die Infrastruktur des Gesamtanlagenparks auf den zukünftigen Bedarf ausgerichtet) und wichtige Rahmenbedingungen zur Energieproduktion aus Abfall werden angepasst. Alleine dank den Optimierungen auf den Anlagen, ohne die Stoffströme neu zu lenken, kann gegenüber dem Szenario «Weiter wie bisher» die exergetische Wirkung um rund 900 GWh (knapp 50% der Gesamtzunahme) gesteigert werden. Die Wirkung der optimierten Lenkung der Stoffströme kann nicht isoliert vom Gesamtmodell beurteilt werden. Wird jedoch eine der Hauptmassnahmen der Stoffstromlenkung betrachtet, nämlich die Exportbeschränkung von Altholz, kann eine Zunahme der Elektrizitätsproduktion um rund 550 GWh (knapp 30% der zusätzlichen Stromproduktion) ausgewiesen werden.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die energetischen Wirkungen der einzelnen Massnahmenbündel (vgl. Kapitel 6.2).

Energetische Wirkung pro Massnahmenbündel		
Lenkung der Abfallströme	Auswirkungen gegenüber «Weiter wie bisher»	Quantifizierung
Gesamtbeurteilung	Die gesamte Wirkung des Massnahmenbündels «Lenkung der Abfallströme» kann nicht losgelöst von Gesamtmodell beurteilt werden. Die Wirkung einer der Hauptmassnahmen, nämlich der Exportbeschränkung von Altholz kann jedoch ausgewiesen werden. Die nicht-exportierten Mengen Altholz werden auf die inländischen KVA Typ 4 (Stromanlagen) umgelenkt. Dadurch kann die Elektrizitätsproduktion um rund 550 GWh gesteigert werden.	en./ex.: +550 GWh
Beurteilungskriterien		
Elektrizitätsproduktion	Die Elektrizitätsproduktion kann dank der Umlenkung der bisher exportierten Altholzmengen auf inländische KVA stark gesteigert werden.	en./ex.: +550 GWh
Wärmeproduktion	Auf die Wärmeproduktion hat die Exportbeschränkung keinen Einfluss, da der Bedarf an Wärmeenergie aus Abfällen im optimierten Szenario mit inländischen Abfällen gedeckt werden kann.	0 GWh
Zementwerke		
Gesamtbeurteilung	Der Energieinput aus Abfallströmen nimmt bei Zementwerken um rund 30% zu. Der Wirkungsgrad der Stromerzeugung steigt leicht an. In der Gesamtsumme wird die Energienutzung um 32% gesteigert, wenn die Wertigkeiten der verschiedenen Energieformen gewichtet werden.	
Beurteilungskriterien		
Elektrizitätsproduktion	Die Elektrizitätsproduktion in den Zementwerken wird etwa verdoppelt.	en./ex.: +30 GWh
Wärmeproduktion	Die Wärmenutzung in Zementwerken kann gegenüber der Referenzentwicklung um rund einen Drittel erhöht werden.	energetisch: +400 GWh exergetisch: +300 GWh

Energetische Wirkung pro Massnahmenbündel**Industrielle Heizkraftwerke und Sonderverbrennungen**

Gesamtbeurteilung	Der Energieinput aus Abfallströmen verändert sich bei industriellen Heizkraftwerken zwischen den Szenarien «Weiter» und «Optimiert» nicht. Der Wirkungsgrad wird jedoch verbessert. Auch der Wirkungsgrad der Stromerzeugung steigt. In der Gesamtsumme kann die Energienutzung um ¼ gesteigert werden, wenn die Wertigkeiten der verschiedenen Energieformen gewichtet werden.	
--------------------------	---	--

Beurteilungskriterien

Elektrizitätsproduktion	Die Elektrizitätsproduktion kann mehr als verdoppelt werden.	en./ex.: +110 GWh
Wärmeproduktion	Die Fernwärmerzeugung in industriellen Heizkraftwerken wird zu Gunsten der Prozessdampf- und Stromerzeugung aufgegeben. In der Bilanz der Wärmeenergienutzung resultiert keine Veränderung. Exergetisch betrachtet kann die Energienutzung jedoch gesteigert werden.	energetisch: +0 GWh exergetisch: +120 GWh

KVA im Industrieverbund (Typ 1)

Gesamtbeurteilung	Der Wirkungsgrad der Wärmeerzeugung kann, zulasten der Stromproduktion, verbessert werden; der Energieinput aus den Abfallströmen nimmt jedoch leicht ab. Die Stromerzeugung nimmt ab; die Produktion von Prozessdampf bleibt etwa konstant.	
--------------------------	--	--

Beurteilungskriterien

Elektrizitätsproduktion	Die Stromerzeugung geht um rund die Hälfte zurück.	en./ex.: -60 GWh
Wärmeproduktion	Die Prozessdampferzeugung verändert sich kaum. Die Nutzung von Niedertemperaturwärme wird jedoch aufgehoben.	energetisch: -30 GWh exergetisch: +0 GWh

Fernwärme-KVA in Bandlast (Typ 2)

Gesamtbeurteilung	Die Anlagenwirkungsgrade können verbessert werden und es findet eine starke Erhöhung der verwerteten Abfallmengen statt. Dadurch kann die Energieproduktion bedeutend gesteigert werden.	
--------------------------	--	--

Beurteilungskriterien

Elektrizitätsproduktion	Die Elektrizitätsproduktion kann etwa verdoppelt werden.	en./ex.: +350 GWh
Wärmeproduktion	Die Wärmeeinspeisung in Fernwärmenetze steigt ebenfalls um ca. den Faktor 2.	energetisch: +1'600 GWh exergetisch: + 300 GWh

Fernwärme-KVA mit saisonaler Betriebsweise (Typ 3a)

Gesamtbeurteilung	Die Stoffströme werden zu einem grossen Teil auf andere Anlagentypen umgelenkt, deshalb nimmt die Energieproduktion in saisonalen Anlagen stark ab.	
--------------------------	---	--

Beurteilungskriterien

Elektrizitätsproduktion	Die Stromproduktion geht um 80% zurück. Dies ist die Folge der Umverteilung der Stoffströme gemäss der Priorisierung der Anlagen anhand der Wirkungsgrade.	en./ex.: -630 GWh
Wärmeproduktion	Die Fern- und Niedertemperaturwärme aus saisonalen Fernwärme-Anlagen nimmt ebenfalls ab, trotz des verbesserten Anlagenwirkungsgrades. In der exergetischen Bilanz fällt dies jedoch viel weniger stark ins Gewicht als in der Energiebilanz. Grund dafür ist ebenfalls die Umlenkung der Stoffströme.	energetisch: -720 GWh exergetisch: -80 GWh

Energetische Wirkung pro Massnahmenbündel		
Strom-KVA (Typ 4)		
Gesamtbeurteilung	Die Wärmenutzung in der KVA dieses Typs wird vollständig aufgehoben, dafür kann die Stromproduktion stark erhöht werden. Dies dank verbesserter Wirkungsgrade und einer Verdopplung des Energieinhalts der verwerteten Abfallmengen.	
Beurteilungskriterien		
Elektrizitätsproduktion	Die Elektrizitätsproduktion kann verdreifacht werden.	en./ex.: +1'480 GWh
Wärmeproduktion	Die Wärmeproduktion wird vollständig zurückgefahren. Da jedoch insbesondere die Niedertemperaturwärme mit einer sehr tiefen Wertigkeit gewichtet wird, wird deren Rückgang nur sehr gering bewertet.	energetisch: -570 GWh exergetisch: -60 GWh

Tabelle 13 Beschreibung und Quantifizierung der energetischen Auswirkungen der einzelnen Massnahmenbündel im Szenario «optimierte Abfallwirtschaft»
(Abkürzungen: en. = energetisch; ex. = exergetisch)

6.3.2 Auswirkungen auf die Infrastrukturen der Abfallwirtschaft

In einem nächsten Schritt wird untersucht, welche Auswirkungen die Optimierung der Abfallwirtschaft auf den Bedarf an Infrastrukturen hat. Dazu wird basierend auf dem Energieoutput und der thermischen und elektrischen Leistung der verschiedenen Anlagentypen der notwendige Anlagenpark abgeschätzt. Diese Abschätzung dient der Ermittlung der notwendigen Investitionen für den zusätzlichen Bedarf an Infrastruktur in den Szenarien «Weiter wie bisher» und «optimierte Abfallwirtschaft» sowie für die vorgesehenen Optimierungsmassnahmen.

In der nachfolgenden Tabelle 14 sind die Zementwerke nicht aufgeführt; bei ihnen wird davon ausgegangen, dass die Zahl der Anlagen konstant bleibt.

		Ind. Heizkraftwerke / Sonderverbrennungen	KVA im Industrieverbund (Typ 1)	Fernwärme-KVA in Bandlast (Typ 2)	Fernwärme-KVA, saisonale Betriebsweise (Typ 3a)	Strom-KVA (Typ 4)
Szenario Ist 2012						
Anzahl Anlagen		26	5	5	15	6
Ø Abfallinput pro Anlage	t/a		79'400	117'200	120'200	156'300
Ø Feuerleistung	MWout	10	20	25	10	10
Volllaststunden (thermisch)	h	8'000	8'000	8'00h	8'000	8'000
Summe Leistung thermisch	MWth	258	94	113	146	19
Summe Leistung elektrisch	MWel	4	11	23	102	56
Szenario «Weiter wie bisher» 2035						
Anzahl Anlagen		34	4	5	13	9
Ø Abfallinput pro Anlage	t/a		98'750	158'000	121'600	131'700
Ø Feuerleistung	MWout	10	25	30	15	10
Volllaststunden (thermisch)	h	8'000	8'000	8'000	8'000	8'000
Summe Leistung thermisch	MWth	339	105	163	194	71
Summe Leistung elektrisch	MWel	9	15	38	103	92
Szenario «optimierte Abfallwirtschaft» 2035						
Anzahl Anlagen		34	3	5	6	5
Ø Abfallinput pro Anlage	t/a		108'300	266'200	68'800	514'000
Ø Feuerleistung	MWout	10	30	70	20	50
Volllaststunden (thermisch)	h	8'000	8'000	8'000	6'500	8'000
Summe Leistung thermisch	MWth	354	101	366	129	0
Summe Leistung elektrisch	MWel	50	50	140	128	243

Tabelle 14: Abschätzung des notwendigen Anlagenparks je nach Szenario

Die Abschätzung zeigt, dass im Szenario «Weiter wie bisher» bis im Jahr 2035 etwa 8 neue Anlagen notwendig wären, um die anfallenden Abfallmengen verarbeiten zu können. Diese betreffen jedoch nur die industriellen Heizkraftwerke. Bei den KVA verändert sich die Gesamtanzahl nicht; es findet jedoch eine leichte Verschiebung zwischen den verschiedenen Anlagentypen statt. Im Szenario «optimierte Abfallwirtschaft» werden in der Summe 11 Anlagen weniger benötigt als im «Weiter wie bisher», bzw. gegenüber heute 3 Anlagen weniger. Ein Ausbau findet dennoch bei den industriellen Heizkraftwerken statt, welche um geschätzte 10 Anlagen zunehmen. Bei den KVA wird eine Entwicklung hin zu weniger, dafür bedeutend grösseren Anlagen angenommen. Die Anzahl KVA sinkt von heute rund 30 auf rund 20 Anlagen. Der Rückgang betrifft insbesondere die saisonalen Anlagen. Dafür werden die Fernwärme- und Stromanlagen von ihrer Gesamtleistung her stark ausgebaut. Die Verlagerung hin zum Ausbau der Fernwärme und der Stromproduktion bedeutet, dass die Standortfrage der Anlagen zukünftig eine noch stärkere Bedeutung gewinnt. Der Ausbau von grossen Fernwärmenetzen bedingt, dass die Anlagen an Standorten mit einer genügend grossen Zahl an Abnehmern mit ganzjährigem Wärmebedarf liegen. Bei Anlagen mit Ausrichtung auf die Elektrizitätsproduktion ist zwar der Standort im Hinblick auf die Einspeisung weniger relevant. Da jedoch davon

ausgegangen wird, dass ein Grossteil dieser Anlagen eine Flusswasserkühlung einrichtet, muss ebenfalls geklärt werden, welche Standorte dafür in Frage kommen.

6.3.3 Investitionen und Wirtschaftlichkeit

Die erforderlichen Investitionen für den Aufbau und die Erneuerung der Infrastruktur werden für die beiden Szenarien «Weiter wie bisher» und «optimierte Abfallwirtschaft» abgeschätzt. Da insbesondere die Kostendifferenz zwischen den beiden Szenarien von Interesse ist, werden nicht sämtliche Investitionen bilanziert, sondern nur diejenigen, welche in den beiden Szenarien unterschiedlich sind. Die Kostenabschätzung in der folgenden Tabelle 15 basiert auf der Ebene der Massnahmenbündel, d.h. sie berücksichtigt die Massnahmen zur Lenkung der Stoffströme sowie zur Optimierung der verschiedenen Anlagentypen. Zudem werden je Anlagentyp die Kosten für den Zubau von Anlagen je nach Szenario ausgewiesen. Die Kosten für die Sanierung von bestehenden Anlagen wurden nur berücksichtigt, wenn sie sich in den beiden Szenarien unterscheiden; dies ist bei den KVA der Fall, da eine Verschiebung zwischen den Anlagentypen stattfindet und sich die Grösse der Anlagen verändert. Die Sanierungskosten wurden unter der Annahme berechnet, dass alle Anlagen bis im Jahr 2035 einen Erneuerungszyklus durchlaufen. Sie sind in derselben Grössenordnung wie die Kosten für einen Anlagenneubau. Ausserdem werden auch die Kosten für den Rückbau von Anlagen abgeschätzt.

	«Weiter wie bisher»			«Optimierte Abfallwirtschaft»				
	Zubau neue Anlagen	Investitionen für Neuanlagen oder Sanierungen	Investitionen für Optimierungsmassnahmen	Zubau neue Anlagen	Optimierungsmassnahmen bestehende Anlagen	Investitionen für Neuanlagen oder Sanierungen	Investitionen für Optimierungsmassnahmen	Mehrinvestitionen
Massnahmenbündel/Anlagen	Anz.	Mio. CHF	Mio. CHF	Anz.	Anz.	Mio. CHF	Mio. CHF	Mio. CHF
Lenkung der Abfallströme			120				360	240
Zementwerke	0	0	0	0	6	0	93	93
Industrielle Heizkraftwerke	8	558	10	9	26	605	165	202
KVA im Industrieverbund (Typ 1)	0	600	0	0	3	450	164	14
Fernwärme-KVA in Bandlast (Typ 2)	0	900	66	0	5	1'050	503	587
Fernwärme-KVA, saisonale Betriebsweise (Typ 3a)	0	800	0	0	6	600	321	121
Strom-KVA (Typ 4)	3	1'080	0	0	5	1'350	90	360
Rückbau von Anlagen		60				300		240
Gesamttotal		4'000	200			4'350	1'700	1'860

Tabelle 15: Schätzung der Mehrinvestitionen der «optimierten Abfallwirtschaft» gegenüber «Weiter wie bisher». Preisniveau des Jahres 2013 (Die detaillierte Kostenzusammenstellung befindet sich im Anhang A-13.)

Die notwendigen Mehrinvestitionen für die optimierte Abfallwirtschaft im Vergleich zum Referenzszenario werden damit auf rund 1.9 Milliarden CHF geschätzt.

Die Kapitalkosten für die ausgewiesenen Mehrinvestitionen betragen rund 120 Mio. CHF pro Jahr, wenn mit einer Amortisationsdauer von 20 Jahren und einem Zinssatz von 3% gerechnet wird. Hinzu kommen Mehraufwände bei den Betriebskosten im Szenario «optimierte Abfallwirtschaft». Unter der Annahme dass die Betriebs-, Unterhalts- und Personalkosten je ca. 2% der Investitionskosten ausmachen, resultieren insgesamt für Betrieb und Unterhalt Mehraufwände von rund 110 Mio. CHF. Gesamthaft werden die Mehrkosten für Kapital, Betrieb und Unterhalt der optimierten Abfallwirtschaft im Vergleich zu «Weiter wie bisher» also auf etwa 230 Mio. CHF pro Jahr geschätzt.

Es wird nun geprüft, ob die entstehenden Mehrkosten durch die Mehreinnahmen aus der erhöhten Energieproduktion gedeckt werden können. Der Energieabsatz steigt im optimierten Szenario um 800 GWh Wärmeenergie und 1'300 GWh Elektrizität pro Jahr. Unter der Annahme, dass im Jahr 2035 durchschnittlich ein Wärmeerlös von 9.6 Rp./kWh (Endverbraucherpreis, vgl. Tabelle 7)²³ und ein Stromerlös von 10 Rp./kWh (Produzentenpreis, Schätzwert) erzielt wird, betragen die Mehreinnahmen durch den gesteigerten Energieabsatz rund 210 Mio. CHF pro Jahr. Bei der Berechnung unter diesen Annahmen können die Mehreinnahmen im Szenario «optimierte Abfallwirtschaft» die Mehrkosten knapp nicht decken; es fehlen jährlich rund 20 Mio. CHF.

Es ist zu beachten, dass die Wirtschaftlichkeitsrechnung mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist. Einerseits basiert die Abschätzung der Mehrinvestitionen für die «optimierte Abfallwirtschaft» auf groben Erfahrungswerten und verschiedenen Annahmen. Andererseits kann die Entwicklung der Energiepreise unvorhersehbaren Schwankungen - insbesondere saisonalen - unterliegen, welche die zu erwartenden Mehreinnahmen beeinflussen. Diese Unsicherheiten sind bei der Beurteilung der wirtschaftlichen Auswirkungen zu berücksichtigen.

6.3.4 Auswirkungen auf die Umwelt

Das Ziel der Bewertung der Umweltauswirkungen ist es abzuklären, ob durch die Optimierung der Abfallwirtschaft, neben der erheblichen Substitution von fossilen Energieträgern und der damit verbundenen Reduktion von Umweltbelastungen, nicht auch zusätzliche negative Umweltauswirkungen verursacht werden.

Für die Beschreibung der Auswirkungen auf die Umwelt werden die Treibhausgasemissionen basierend auf einer quantitativen Abschätzung von CO₂-Äquivalenten zwischen den Szenarien «Weiter wie bisher» und «optimierte Abfallwirtschaft» sowie gegenüber dem Ist-Zustand 2012 verglichen. Dabei handelt es sich um eine nationale Betrachtung, in welcher der potenzielle Beitrag der optimierten Abfallwirtschaft zu den Schweizer CO₂-

²³ Für den Fernwärmeerlös wird der Endverbraucherpreis verwendet, da in der Berechnung der Mehrkosten der optimierten Abfallwirtschaft die Investitionen in die Fernwärmenetze enthalten sind.

Reduktionszielen abgeschätzt wird. Die Gesamtumweltauswirkungen werden nachfolgend qualitativ beurteilt.

Verminderung der Treibhausgasemissionen

Bei der Berechnung der Emissionsverminderungen wird davon ausgegangen, dass wenn die entsprechenden Energiemengen nicht aus der Abfallverwertung bereitgestellt werden können, sie weiterhin auf konventionellem Weg erzeugt werden. Daraus resultiert eine Gutschrift der substituierten Energie bzw. der vermiedenen CO₂-Emissionen im Szenario der optimierten Abfallwirtschaft im Vergleich zu «Weiter wie bisher» bzw. zu heute. Die CO₂-Emissionen der Abfallbehandlung selbst werden in der Berechnung nicht bilanziert. Sie werden im Vergleich der Szenarien als «neutral» betrachtet, da sie sich pro Tonne verwerteter Abfälle nicht verändern.

Die Berechnung der Emissionsverminderungen in der folgenden Tabelle 16 zeigt, dass die Treibhausgasemissionen insbesondere dank der Brennstoffsubstitution in den Zementwerken stark vermindert werden können. Aber auch die Substitution fossiler Energieträger bei der Prozessenergieerzeugung bewirkt einen grossen Einspareffekt. Für die Emissionsverminderungen dank der verstärkten Elektrizitätsproduktion in der Abfallverwertung ist ausschlaggebend, welcher Strommix damit substituiert wird. In der nachfolgenden Tabelle wird der Status Quo (CH-Produktionsmix) von der zu erwartenden Technologie für die zusätzliche Elektrizitätserzeugung (Gas-Kombianlagen, GuD) unterschieden. Das gesamte Einsparpotential wird dementsprechend für beide Alternativen ausgewiesen. Dabei wird mit den CO₂-Faktoren gemäss (Frischknecht et al. 2012) gerechnet.

Energie aus der Abfallverwertung	Substituierter Brennstoff	Vergleich zum Ist-Zustand 2012		Vergleich zu «Weiter wie bisher» 2035	
		Substituierte Energie	Emissionsverminderung CO ₂	Substituierte Energie	Emissionsverminderung CO ₂
Wärme		GWh	t CO ₂ -Äq.	GWh	t CO ₂ -Äq.
Prozessenergie (Zementwerk)	Kohle und Koks	682	295'000	399	172'000
Prozessdampf	Erdgas/Erdöl (80/20)	1'292	323'000	558	139'000
Prozess- und Fernwärme	Erdgas/Erdöl (80/20)	961	240'000	413	103'000
NT-Wärme	Erdgas/Erdöl (80/20)	215	54'000	-543	-136'000
Elektrizität	CH-Produktionsmix	1'864	54'000	1'283	37'000
oder	Produktion in GuD	1'864	906'000	1'283	624'000
Biogas	Erdgas	85	17'000	0	0
Total	mit CH-Produktionsmix		983'000		315'000
Total	mit Produktion in GuD		1'835'000		902'000

Tabelle 16: Emissionsverminderungen der optimierten Abfallwirtschaft in der Schweiz im Vergleich zum Ist-Zustand 2012 und zu «Weiter wie bisher» (in t CO₂-Äquivalenten)
CO₂-Faktoren gemäss Frischknecht et al. (2012)

Die gesamten CO₂-Emissionen²⁴ aus fossilen Brenn- und Treibstoffen betragen in der Schweiz heute rund 40 Mio. Tonnen (Wert 2010, Prognos 2012a). Im Szenario «Neue Energiepolitik» der Energieperspektiven 2050 wird davon ausgegangen, dass sich diese bis im Jahr 2035 etwa auf 20 Mio. Tonnen halbieren werden. Die im Vergleich zum heutigen Zustand erzielten Emissionsverminderungen im Szenario «optimierte Abfallwirtschaft» betragen also in der Betrachtung mit dem Schweizer Elektrizitätsmix 2.5% bzw. in der Grenzbetrachtung mit Produktion in Gaskombikraftwerken (GuD) 4.5% der heutigen CO₂-Emissionen. Im Vergleich zu «Weiter wie bisher» betragen die Einsparungen knapp 1% (CH-Mix) bzw. 2.5% (GuD) der heutigen Emissionen.

Es ist zu beachten, dass die ausgewiesene Wirkung zur Emissionsverminderung der optimierten Abfallwirtschaft eine rein nationale Betrachtung darstellt. Dies betrifft den Effekt der Massnahme zur Exportbegrenzung. Die im optimierten Szenario nicht mehr exportierten Abfallfraktionen bewirken einen beträchtlichen Anteil der Emissionseinsparungen in der Schweiz, insbesondere dank der gesteigerten Stromproduktion aus der Verwertung dieser Abfälle. Das bedeutet, dass die Substitution von fossilen Energieträgern im System Schweiz bilanziert wird; im Referenzszenario würde diese aber de facto im Exportland anfallen. Die Optimierung in der Schweiz führt also unter Umständen zu einer Verschlechterung der Emissionsbilanz im Ausland. Die Berechnung von Emissionsverminderungen in den Exportländern wäre allerdings sehr spekulativ, da nicht genau bekannt ist, wie die Abfallfraktionen genutzt werden (bspw. inwiefern Altholz in der Spanplattenproduktion oder energetisch genutzt wird). Deshalb sind die gesamten Treibhausgaseinsparungen nicht als Gesamtbilanz zu verstehen, sondern weisen nur den Effekt der Transformation der Abfallwirtschaft in der Schweiz aus.

Gesamtumweltauswirkungen

Die weiteren Umweltauswirkungen der optimierten Abfallwirtschaft, welche zusätzlich zu den Veränderungen der Treibhausgasemissionen relevant sind, werden im Folgenden qualitativ beurteilt. Dabei werden einerseits Veränderungen von Emissionen betrachtet, welche negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Ökosysteme haben können. Andererseits werden auch Veränderungen des Ressourcenverbrauchs beurteilt. Der Verbrauch von fossilen Energieträgern wurde bereits in der Beurteilung der Treibhausgasemissionen, aus einer nationalen Perspektive, berücksichtigt. Dank der erhöhten Energienutzung aus der Abfallverwertung kann im Vergleich zu «Weiter wie bisher» die Substitution von fossilen Ressourcen in der Schweiz verstärkt werden (vgl. auch Tabelle 16).

Zwei Effekte sind für eine mögliche Veränderung der Umweltauswirkungen der optimierten Abfallwirtschaft gegenüber dem Szenario «Weiter wie bisher» massgeblich: einerseits die Umverteilung der Abfallströme zwischen den verschiedenen Typen von Verwertungsanlagen und andererseits die Exportbeschränkung, welche v.a. Altholz und in geringerem Masse auch RESH und Kunststoffe betrifft. Die bisherige grundsätzliche Aufteilung der

²⁴ Inländische Emissionen der direkt verbrauchten Brenn- und Treibstoffe, ohne Kompensationen.

Schweizer Abfallströme zwischen stofflicher und energetischer Nutzung wird im optimierten Szenario nicht in Frage gestellt. Deshalb werden die bestehenden Recyclingprozesse nicht verändert und es sind diesbezüglich keine negativen Effekte auf die Ressourcenverfügbarkeit zu erwarten.

1. Umweltauswirkungen aufgrund der Exportbeschränkung:

Die Exportbeschränkung betrifft in erster Linie Altholz, das im Ausland entweder in der Spanplattenproduktion oder energetisch genutzt wird. Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass die Spanplattenproduktion aus Altholz als Schritt in einer Kaskadennutzung gegenüber der direkten energetischen Nutzung ökologisch vorteilhaft ist. Sie ist jedoch mit dem Risiko einer nicht dem Schweizer Standard entsprechenden Endentsorgung behaftet. Die stoffliche Altholzverwertung im Ausland hat jedoch in den letzten Jahren abgenommen. Ein grosser Teil des exportierten Altholzes wird heute energetisch genutzt und substituiert damit im Exportland mit grosser Wahrscheinlichkeit fossile Energieträger. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine energetische Nutzung in der Schweiz in hocheffizienten Anlagen mit gesetzeskonformer Rauchgasreinigung aus ökologischer Sicht mindestens gleich gut beurteilt werden kann, wie die energetische Nutzung im Ausland. Es wird deshalb nicht mit zusätzlichen negativen Umweltauswirkungen durch die Exportbeschränkung von Altholz gerechnet. Die Exportbeschränkung von Kunststoffen wird ebenfalls als neutral beurteilt, da die zusätzlichen Kunststoffe in der Schweiz in Zementwerken genutzt werden. Diese Nutzung wird in Ökobilanzen deutlich positiver bewertet als die Nutzung in KVA, sofern es sich um nicht belastete Kunststoffe handelt (vgl. untenstehende Begründung). Negative Umweltauswirkungen wären dann möglich, wenn die exportierten Kunststoffe im Ausland einer stofflichen an Stelle einer energetischen Verwertung zugeführt würden oder wenn belastete Materialien in der Zementproduktion verwertet und mit dem Zement in die Umwelt ausgetragen werden. Zum Stellenwert der stofflichen Verwertung von exportiertem Kunststoff stehen den Autoren/innen keine fundierten Grundlagen zu Verfügung. Eine abschliessende Beurteilung, ob negative ökologische Auswirkungen durch Exportbeschränkungen von Kunststoffen vorliegen, ist deshalb nicht möglich. Die Wahrscheinlichkeit wird als gering beurteilt.

2. Umweltauswirkungen aufgrund der Stofflenkung zwischen den Verwertungsanlagen:

Mit der vorgeschlagenen Optimierung der Abfallwirtschaft erfolgen einerseits eine Umverteilung der Stoffströme zwischen KVA und den Zementwerken und andererseits eine veränderte Verteilung der Verwertung in den unterschiedlichen KVA-Typen.

Betreffend die Umlenkung von den KVA auf die Zementwerke, welche gegenüber «Weiter wie bisher» zusätzliche Kunststoffmengen erhalten, gibt es zwei relevante Aspekte. Einerseits gelten für die Zementwerke geringere Rauchgasreinigungsanforderungen als für die KVA. Andererseits können die Rückstände, die mit dem Zement ausgetragen und verbaut werden, nicht endgelagert werden. Diese beiden Effekte können als negative Auswirkungen beurteilt werden. Ökobilanzen zeigen jedoch, dass diese negativen Effekte durch die höhere Substitution fossiler Energieträger bei der Verwertung in Zementwerken anstatt in KVA kompensiert werden (z.B. Carbotech 2012), sofern die im Zementwerk verwerteten Materialien nicht mit Schadstoffen belastet sind. Es muss zudem berücksich-

tigt werden, dass die Verwertung von sortenreinen Fraktionen in Zementwerken ein zusätzlicher (Energie-)Aufwand für die Separierung bedingt.

Bei der Umlenkung von Stoffströmen zwischen den verschiedenen KVA-Typen im Inland ist nicht mit erhöhten Umweltbelastungen durch Emissionen zu rechnen, da alle KVA die Anforderungen der Luftreinhalteverordnung erfüllen. Gewisse logistische Massnahmen, die Bestandteil der Umlenkung sind, erhöhen zwar den Transportaufwand gegenüber dem Szenario «Weiter wie bisher». Diese zusätzlichen Auswirkungen fallen jedoch im Vergleich zu den Effizienzgewinnen nicht ins Gewicht. Die Auswirkungen der erhöhten Logistik sind jedoch auch davon abhängig, ob der Transport auf der Schiene oder der Strasse abgewickelt wird.

Die Umverteilung der Stoffströme ist zudem mit einer Veränderung des Anlagenparks verbunden. Es stellt sich daher die Frage, ob damit eine verstärkte Landnutzung und erhöhte Bodenversiegelung einhergehen. Insgesamt besteht der Anlagenpark im optimierten Szenario aus einer kleineren Gesamtzahl von Anlagen als im Szenario «Weiter wie bisher» (Differenz von 11 Anlagen). Diese werden dafür durchschnittlich etwas grösser ausgestaltet. Die Auswirkungen auf die Landnutzung werden deshalb positiv bewertet, da davon ausgegangen wird, dass weniger Landflächen zusätzlich versiegelt werden. Dies bedingt aber, dass bei der Umsetzung darauf geachtet wird, dass wo möglich bei einem Anlagenneubau bestehende Anlagen- oder andere Infrastrukturstandorte genutzt werden. Auch ist zu berücksichtigen, dass die Reduktion der Anlagenzahl einen Ausbau der Logistikinfrastruktur bedingt. Diesbezüglich ist es für die Frage der Versiegelung ebenfalls relevant, auf welchen Flächen zusätzliche Infrastruktur installiert wird.

Basierend auf der vorgenommenen qualitativen Beurteilung kann das Fazit gezogen werden, dass das Szenario «optimierte Abfallwirtschaft» aus ökologischer Sicht mindestens gleich gut, wenn nicht leicht besser abschneidet als das Szenario «Weiter wie bisher».

Gesamtbeurteilung der Umweltauswirkungen

Werden die Schlussfolgerungen aus der Bilanz der Treibhausgasemissionen sowie der qualitativen Beurteilung der Umweltauswirkungen zusammengefasst, schneidet das Szenario «optimierte Abfallwirtschaft» im Vergleich zu «Weiter wie bisher» deutlich positiv ab. Die Treibhausgasemissionen der Elektrizitäts- und Wärmeproduktion können dank der Substitution fossiler Energien stark reduziert werden. Bei den weiteren Umweltauswirkungen wie Versiegelung, Transportaufwände oder Schadstoffemissionen werden im Vergleich zu «Weiter wie bisher» keine negativen Auswirkungen erwartet; tendenziell sind eher Verbesserungen der Umweltbilanz anzunehmen.

7 Herausforderungen der Umsetzung und Empfehlungen

7.1 Anpassungsbedarf Infrastrukturen und Logistik

Die Forderung nach einer höchstmöglichen Energieausbeute aus den Abfällen hat eine Spezialisierung im Bereich der KVA zur Folge. Anlagen mit hauptsächlich Prozessdampf-abgabe (Typ 1) bleiben bei den Industriepartnern, so lange diese den Dampfbezug benötigen. Sinnvollerweise werden durch eine koordinierte Energie- und Raumplanung auch zusätzliche Betriebe angegliedert, um das Klumpenrisiko zu verringern. Die Stadtanlagen in grossen Fernwärmenetzen (Typ 2) werden ihre Kapazitäten aufrecht erhalten oder evtl. sogar um «Winterlinien» ergänzen. Nur wenige Fernwärme-KVA mit saisonaler Betriebsweise (Typ 3a) verbleiben im typischen Muster von Winterwärme und Sommerstrom. Sie müssen auf saisonalen Betrieb getrimmt werden, um in den ineffizienten Sommermonaten nur ein Minimum an Abfall zu verwerten. An guten Standorten können sie zu Stromanlagen (Typ 4) umgebaut werden. Hier findet die grösste Transformation statt. Diese Typ-4-Anlagen werden einiges grösser als heutige Anlagen, verwerten teilweise auch Altholz und liegen nicht im Zentrum des Einzugsgebietes, sondern an guten Lagen für die Energieproduktion.

Daher werden sich in der Abfalllogistik ebenfalls neue Strukturen etablieren. Die Sammelfahrzeuge werden an logistisch möglichst gut gelegenen Orten ihre Fracht (7-9t) in grössere Container oder Sattelzüge umladen (bis zu 24t Nutzlast), die von diesen neu zu errichtenden Umladestationen her die Abfallanlagen auf der Schiene oder auf der Strasse beliefern. Damit wird auch eine Flexibilisierung erzielt, da so umgeladene Abfallmengen in beliebige Anlagen (bzw. auch Abfalllager) geschickt werden können. Die überregionale Abfallplanung muss Strukturen hervorbringen, die diese Zuteilung dynamisch überwachen und die Abfallströme entsprechend steuern können.

7.2 Herausforderungen der Umsetzung

Die Transformation der Schweizerischen Abfallwirtschaft ist mit grossen Herausforderungen verbunden:

Hohe Investitionen

Die Mehrinvestitionen gegenüber dem Szenario «Weiter wie bisher» betragen knapp 2 Mia. CHF. Über die nächsten 20 Jahre fallen Mehrkosten von jährlich rund 230 Mio. CHF an. Bei den heutigen Energiepreisen sind nur ein Teil der Investitionen in die verbesserte Energienutzung amortisierbar. Unter diesen Voraussetzungen ist die Finanzierung der Anlagen und der Effizienzverbesserungen noch ungelöst.

Kohärente Standortplanung

Es ist eine langfristige Koordination mit der Raumplanung nötig, die unter kantonaler Hoheit liegt. Mit der Transformation der Schweizerischen Abfallwirtschaft ist eine Systemumkehr verbunden, da die energetischen Kriterien bei der Standortwahl von Abfallan-

lagen ein deutlich höheres Gewicht erhalten. Dazu gehören beispielsweise die Nähe zu städtischen Fernwärmenetzen, zu Industriestandorten, zu möglichen Niedertemperaturnachfragegebieten sowie u.a. das Vorhandensein einer Flusskühlung. Die Rahmenbedingungen dieser Standorte in ökologischer Hinsicht (z.B. Gewässerschutz) und bezüglich zukünftiger Entwicklung der Energienachfrage (Energieeffizienzverbesserungen von Anlagen und Gebäuden) bedingen optimale Standorte und damit eine übergeordnete Standortplanung. Diese kann im Widerspruch zu den lokalen Zielsetzungen von Zweckverbänden oder Kantonen liegen.

Trägerschaften für industrielle Heizkraftwerke

Die optimierte Schweizerische Abfallwirtschaft beinhaltet rund 30 industrielle Heizkraftwerke. Es stellen sich für die durch die Abfallanlage versorgten Industriebetriebe Fragen zur Versorgungssicherheit, Abdeckung der Risiken und Trägerschaft. Da die Industriebetriebe in der Regel nicht bereit sein dürften, Risiken für den Bau und Betrieb dieser Anlagen zu tragen, braucht es Trägerschaften, welche die Anlagen im Contracting betreiben und die Versorgung der Industriebetriebe mit Wärme sicherstellen können. Dies bedingt für die Contractoren auch Versorgungssicherheit bezüglich Abfällen und damit eine enge Verbindung zu Abfallwirtschaft.

Fehlende wirtschaftliche Anreize für Energieeffizienzverbesserungen und Anpassungen bei der Logistik

Gemäss den Annahmen zur Energiepreisentwicklung und groben Annahmen zu den Betriebskosten können die Investitionen für eine Anpassung der Logistik (Lagerhaltung, Separierung der Abfälle) und der Effizienzverbesserungen (Fernwärme, ORC-Turbinen etc.) im Jahr 2035 am freien Markt nicht amortisiert werden. Besonders die Entwicklung der Strompreise wird mit grossen Unsicherheiten und erheblichen saisonalen und tageszeitlichen Schwankungen verbunden sein. Dies ist gleichzeitig eine Chance aber auch ein Risiko für die Betreiber der Abfallbehandlungsanlagen. Auf Grund der wirtschaftlichen Konkurrenz der Anlagen beim Marktkehricht bestehen Fehlanreize, da die Preise für die Abfallbehandlung in denjenigen Anlagen tief gehalten werden können, welche keine (zurzeit nicht amortisierbaren) Investitionen in eine Energieeffizienzsteigerung tätigen.

Finanzielle Risiken beim Ausbau der Fernwärme

Der Ausbau der Fernwärmeversorgungen ist mit betrieblichen Risiken verbunden. So nimmt beispielsweise der Wärmebedarf durch Gebäudesanierungen laufend ab und die Abstützung der Energienutzung aus den Abfallanlagen auf einzelne Industriebetriebe ist mit dem Risiko des Fortbestandes und der Entwicklung des Industriebetriebes verbunden. Es braucht deshalb Massnahmen, welche die Fernwärmebetreiber von den teilweise hohen Risiken entlasten.

Politische und zeitliche Herausforderungen

Die Transformation der Schweizerischen Abfallwirtschaft braucht Zeit und einen klar manifestierten politischen Willen. Dazu gehören die Abstimmung von lokalen Absichten und gesamtschweizerischen Interessen sowie der Erlass der nötigen Umsetzungsgesetze bzw. -vorschriften (z.B. Exportbeschränkung für Altholz, Energieeffizienzvorgaben für

KVA, eventuell Anpassung von Umweltauflagen). Der Zeitbedarf für diesen politischen Prozess kann die Zielerreichung bis 2035 gefährden.

Erneuerungsfonds der Kehrichtverbrennungsanlagen

Die Eigentümerschaften der Kehrichtverbrennungsanlagen äufnen heute gesetzlich vorgeschriebene Rückstellungen für den Ersatz der Anlagen nach Ablauf der Lebensdauer. Durch diese erheblichen finanziellen Reserven bestehen Anreize, in die Erneuerung von bestehenden Anlagen, auch solche an nicht optimalen Standorten, zu investieren.

Bestehende Fernwärmeversorgungen

Bereits heute bestehen an Standorten von KVA, welche gemäss der vorgeschlagenen Transformation der Abfallwirtschaft als nicht optimal bezeichnet werden, Fernwärmenetze. Bei einer Aufgabe der KVA ist die Versorgung der bestehenden Fernwärme mit einem ökologisch sinnvollen Energieträger sicherzustellen.

7.3 Empfehlungen

Damit eine Transformation der Abfallwirtschaft Schweiz im Sinne des Szenarios «optimierte Abfallwirtschaft» bis im Jahr 2035 möglich wird, ist der Wille zur verbesserten Koordination der Abfallwirtschaft auf nationaler Ebene eine entscheidende Voraussetzung. Zudem sind Anpassungen an den Rahmenbedingungen notwendig.

Bei der Einführung oder Anpassung von Vorschriften soll der Grundsatz gelten, dass wenn immer möglich Zielvorgaben an Stelle von Detailvorschriften erlassen werden. Es ist eine Stärkung der nationalen Ziele mit einem nationalen Fokus nötig.

Grundprinzipien des offenen Abfallmarktes aufheben oder Marktvorteile für energieeffiziente Anlagen sicherstellen

Zu diskutieren ist, ob das heutige Grundprinzip des Abfallsystems in der Schweiz mit der Unterscheidung zwischen Monopolkehricht und Marktkehricht zielführend ist. Das heutige System bietet eine grosse Flexibilität und leistet Beiträge zur Kosteneffizienz der Anlagen. In einem sich im Wandel befindlichen Abfallsystem beinhaltet es aber die Gefahr, dass ineffiziente Anlagen zu sehr günstigen Grenzkosten Abfälle akquirieren und verwerten können und damit gleichzeitig aus energetischer Sicht die Gesamteffizienz verringern. Die Transformation in eine energieeffizientere Abfallverwertung mit den dafür nötigen Investitionen wird deutlich verlangsamt oder verunmöglicht. Eine Aufhebung der Unterscheidung zwischen Monopolkehricht und Marktkehricht würde mehr Planungssicherheit für die Anlagenbetreiber und eine schnellere Transformation der Abfallwirtschaft ermöglichen. Ein solcher Systemwechsel hin zu einer staatlichen Standort- und Entsorgungsplanung ohne marktwirtschaftliche Elemente birgt jedoch erhebliche Risiken. Sinnvoller erscheint die Einführung von marktwirtschaftlichen Lenkungsmaßnahmen, welche genügend Anreize bieten, dass energieeffiziente Anlagen gegenüber nicht energieeffizienten Anlagen über einen Wettbewerbsvorteil verfügen.

Vorschriften

Für die Verwertungsanlagen sollen Zielvorgaben für die geforderte Energieeffizienz definiert werden, welche mit einem finanziellen Bonus-Malus-System bewertet werden. Ergänzend dazu sollen Mindeststandards zur Energienutzung vorgeschrieben werden. Der finanzielle Bonus-Malus ist so auszugestalten, dass sich auch Verbesserungen bei der Logistik finanziell lohnen.

Für den Export von Abfällen soll eine Nachweispflicht eingeführt werden, dass die Verwertung im Ausland energetisch und ökologisch mindestens gleichwertig wie in der Schweiz erfolgt.

Im Bereich von standortspezifischen Umweltauflagen über die nationalen Vorschriften hinaus ist eine Güterabwägung zwischen einer zusätzlichen Energieproduktion und dem Schutzziel vorzunehmen. Grundsätzlich sollte die zusätzlich nutzbare Energie nicht mit erneuerbarer Energie sondern mit der «umweltschädlichsten» Energiequelle verglichen werden, die einen entsprechenden Spitzenbedarf decken würde. Beispiel: Rauchgastemperaturen am Kamin schwanken zwischen 60°C (effiziente Anlagen) und 160°C (Anlagen mit speziellen Vorgaben wegen möglichen Inversionslagen).

Nationale Koordination

Für die nationale Standortplanung und die Koordination des Transformationsprozesses der Schweizer Abfallwirtschaft muss ein zuständiges Gremium geschaffen werden. Dabei sind auch neue Akteure in die Planung einzubeziehen, wie beispielsweise Betreiber/innen von Zementwerken, industriellen Heizkraftwerke, Abfalllagern, EBS-Aufbereiter, Tieftemperatur-Nutzungen (Fischzüchter, Gewächshausbetreiber,...) u.a.. Über die Zuweisung der Siedlungsabfallmengen haben die Kantone den grössten Hebel in dieser Diskussion. Über Vorschriften und Auflagen für industrielle Heizkraftwerke können auch bezüglich der Stoffstromlenkung der «freien Abfallströme» (Altholz, Rückstände aus Produktionsprozessen, Tiermehl etc.) wichtige Weichen gestellt werden. Es bedarf einen Wechsel der Einstellung aller Akteure, damit Abfallströme nicht als Anrecht und Eigentum einzelner Körperschaften betrachtet werden, sondern als Ressource, die dorthin gesteuert wird, wo sie am sinnvollsten eingesetzt werden kann. Ein nationales Koordinationsgremium kann diesen Wechsel bewirken. Dazu sind die gesetzlichen Grundlagen zu schaffen und die Entscheidungsbefugnisse klar zu bezeichnen.

Im Rahmen dieser überregionalen Planung mit Mengenszenarien (Minimal / Maximal) können die Anlagen auf mögliche Herausforderungen und ihren Entscheidungsbedarf vorbereitet werden. Die Entscheidungsträger im Umfeld der Anlagen und Zweckverbände müssen handlungsfähig (d.h. informiert und befähigt) sein. Zudem ist eine systematische Untersuchung der Fernwärmenetze notwendig, ob der Einsatz von abfallstämmigen Brennstoffen als Substitution fossiler Energie sinnvoll wäre und eine entsprechende Anlagengrösse realistisch betrieben werden kann.

Es braucht eine nationale Genehmigung von regionalen/kantonalen Strategien, um die Umsetzung der nationalen Koordination sicherzustellen. Die attraktiven Standorte müssen mit raumplanerischen Mitteln gesichert werden.

Kostenwälzungsmodell für Energieeffizienzinvestitionen und Energienutzung

Gemäss Umweltschutzgesetz USG gilt bei der Entsorgung von Abfällen das Verursacherprinzip. Die Bestimmungen des USG sind im Bereich der Finanzierung bei Siedlungsabfällen dahingehend zu präzisieren, dass die Mehrkosten einer optimalen Energienutzung den Verursachern der Abfälle übertragen und in die Abfallgebühren integriert werden können, wenn die Energiemärkte diese Investitionen nicht erlauben würden.

Ausgestaltung des Anlagenparks

Die Standorte von Entsorgungsanlagen (Neuanlagen) sind bewusst aufgrund der Energienutzungsmöglichkeiten zu wählen oder letztere sind entsprechend zu entwickeln, beispielsweise durch die Ausscheidung von Industriezonen, aktives Standortmarketing oder attraktive finanzielle Konditionen bei Landverkäufen oder Abgaben im Baurecht. Die Anlagengrösse wird hauptsächlich durch den lokalen Wärmebedarf bestimmt. Reine Stromanlagen sollen so gross wie möglich gebaut werden. Kleine Anlagen ohne signifikante Wärmeabgabe sind zu schliessen. Bestehende Kleinanlagen, die den Bandwärmebedarf in Fernwärmenetzen zu decken vermögen, sollen beibehalten werden. Die saisonalen Fernwärme-Anlagen sollen dazu verpflichtet werden, auch in den Sommermonaten gute Energienutzungsgrade auszuweisen oder die Leistung zu reduzieren.

Logistik

Die Standorte der Entsorgungsanlagen, insbesondere bei den vorwiegend stromproduzierenden Anlagen mit Flusskühlung, liegen voraussichtlich für die Anlieferungen durch Sammelfahrzeuge ungünstig. Deshalb ist zu prüfen, ob weitere Umladestationen die (teure) Anlieferung durch Sammelfahrzeuge ergänzen und den Weitertransport per Bahn oder LKW sowie gebündelte Transporte zu den Lagern oder Anlagen ermöglichen würden. Zudem ist zu prüfen, wie Pufferkapazitäten (Tages-, Wochen- evtl. saisonale Pufferung) eine regional und zeitlich optimale Verwertung verbessern können.

Sicherung der Finanzierung

Damit die Finanzierung des Ausbaus der Fernwärme sichergestellt werden kann, sollen durch den Bund Risikogarantien bei Fernwärmeprojekten, insbesondere bei industriellen Kunden, geleistet werden.

Schaffen von Trägerschaften

Es muss ein System geschaffen werden, das Garantien für Abfalllieferungen an Contractoren bzw. Trägerschaften von industriellen Heizkraftwerken leistet. Es ist zu prüfen, ob die Gründung von neuen Contracting-Unternehmen zweckmässig ist und sich eine rechtliche Grundlage für die Zusicherung der Abfalllieferungen an solche Contractoren schaffen lässt.

Aus- und Weiterbildung

Damit die Ziele erreicht werden können, ist eine gute Information und Weiterbildung der zuständigen Fachpersonen notwendig. Dies beinhaltet die Kenntnis über die übergeordneten Zielsetzungen, die nationale und kantonale/regionale Organisation und Koordination des Vorgehens sowie das technische Wissen betreffend die Veränderungen im Anlagenpark und der Logistik. Der Transfer des erforderlichen Knowhows muss sichergestellt

werden. Betroffen sind beiderseits die zuständigen nationalen und kantonalen Behörden sowie die Anlagenbetreiber. Insbesondere muss ausreichend fachliches Knowhow geschaffen werden, damit die technischen Anpassungen umgesetzt werden können.

Literaturverzeichnis

- Bachmann N., Wellinger A. (2010): Vergärbare Abfälle in der Schweiz. Nova Energie GmbH im Auftrag von Axpo Kompogas AG, August 2010, Aadorf.
- Bachmann Simon et al. (2013): Energieverbrauch in der Industrie und im Dienstleistungssektor, Resultate 2012, Helbling Beratung + Bauplanung Ag im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE, Juli 2013, Bern. BAFU (ehemals BUWAL) (2003): Erhebung der Kehrrechtzusammensetzung 2001/02. Schriftenreihe Umwelt Nr. 356. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BAFU (2011): TVA-Revision, Normkonzept, Bundesamt für Umwelt BAFU, Mai 2011.
- BAFU (Hrsg.) 2012: Jahrbuch Wald und Holz 2012. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1224: 174 S. BFE (2012): Erläuternder Bericht zur Energiestrategie 2050 (Vernehmlassungsvorlage), Bundesamt für Energie BFE, September 2012, Bern.
- BAFU (2013): Erhebung der Kehrrechtzusammensetzung 2012. Bundesamt für Umwelt, Bern
- BFE (2012): Energiestrategie 2050, Bericht des Teilprojekts Energienetze und Ausbaukosten, Bundesamt für Energie BFE, Juni 2012.
- BFE (2013a): Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2012, Bundesamt für Energie BFE, Juni 2013, Bern.
- BFE (2013b): Gesamte Erzeugung und Abgabe elektrischer Energie in der Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, Juni 2013, Bern.
- BFE (2013c): Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2012, Bundesamt für Energie BFE, Juli 2013, Bern.
- BFS (Hrsg.) (2010): Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Schweiz 2010 – 2060. Reihe Statistik der Schweiz. Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
- Botschaft des Bundesrats (2013) Botschaft zum ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050 (Revision des Energierechts) und zur Volksinitiative «Für den geordneten Ausstieg aus der Atomenergie (Atomausstiegsinitiative)», 04. September 2013.
- Carbotech (2012): Ökologischer Nutzen des PE-Folienrecyclings Schweiz (Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe), Basel, Januar 2012. Im Auftrag des BAFU.
- Cemsuisse (Hrsg) 2013: Jahresbericht 2012. Verband der Schweizerischen Zementindustrie, Bern.

- econcept (2014) Begleitender Bericht zur Empfehlung «Wirtschaftlichkeitsrechnung im Hochbau», noch nicht publiziert
- Ecoplan (2011) Branchenszenarien 2008 - 2030. Müller, A., Cretegnny, L., van Nieuwkoop, R, Bern. Im Auftrag der Bundeskanzlei und des Bundesamts für Statistik.
- EnDK (2011) Energiepolitik der EnDK - Eckwerte und Aktionsplan, Konferenz Kantonalen Energiedirektoren, 2. September 2011, Zürich.
- Frischknecht Rolf et al. (2012): Primärenergiefaktoren von Energiesystemen, Version 2.2, ESU-services im Auftrag des Bundesamts für Energie, Juli 2012, Uster.
- Goedkoop M., Spiensma, R. (2001): The Eco-indicator 99 - A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report. Amersfoort 2001, Third edition.
- Hügi M., Gerber P. et al. (2008): Abfallwirtschaftsbericht 2008. Zahlen und Entwicklungen der schweizerischen Abfallwirtschaft 2005-2007. Umwelt-Zustand Nr 0830. Bundesamt für Umwelt, Bern. 119 S.
- Kaufmann Urs (2012): Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz, Ausgabe 2011, Dr. Eicher+Pauli AG im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE, November 2012, Bern.
- Kaufmann Urs (2013): Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien, Ausgabe 2012, Vorabzug, Dr. Eicher+Pauli AG im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE, Juni 2013, Bern.
- Liechti J. (2009): Optimale Nutzung der Energie aus Abfällen. Side Document zur Energiestrategie. Bericht von Neosys AG an Energie Dialog Schweiz²⁵.
- Müller Ernst A. et al. (2013): Potential der Schweizer Infrastrukturanlagen zur Lastverschiebung, InfraWatt im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE, Juni 2013, Bern.
- Primas A. et al (2013): Schweizerische Holzenergiestatistik, Erhebung für das Jahr 2012. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern.
- Prognos (2012a): Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050 – Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000–2050, Prognos AG im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE, September 2012, Basel.
- Prognos (2012b): Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2011 nach Verwendungszwecken, Prognos AG, Infras AG, TEP Energy GmbH im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE, Oktober 2012.

²⁵ Advisory Board: BAFU, VBSA, Holcim, IGEB; nicht vom ETS finanzierte Studie.

SECO (2011): Scénario du SECO pour le PIB à long terme, Staatssekretariat für Wirtschaft, Bern.

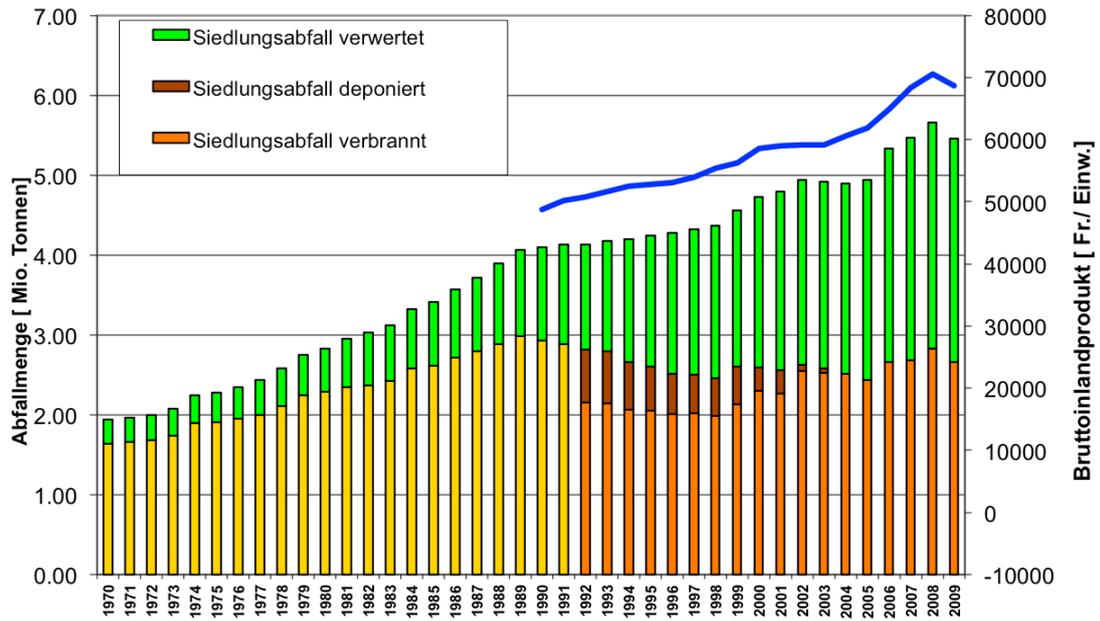
Schelker R., Geisselhardt P. (2011): Projektbericht „Kunststoffverwertung Schweiz“. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Bern.

Anhang

A-1 Abkürzungsverzeichnis

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFE	Bundesamt für Energie
BFS	Bundesamt für Statistik
EE	Erneuerbare Energie
FW	Fernwärme
GuD	Gaskombikraftwerk
KS	Klärschlamm
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
NEP	Neue Energiepolitik
ORC	Organic Rankine Cycle
RESH	Shredderrückstände aus dem Autorecycling
TS	Trockensubstanz
TVA	Technische Verordnung über Abfälle
USG	Umweltschutzgesetz
WKK	Wärme-Kraft-Kopplung

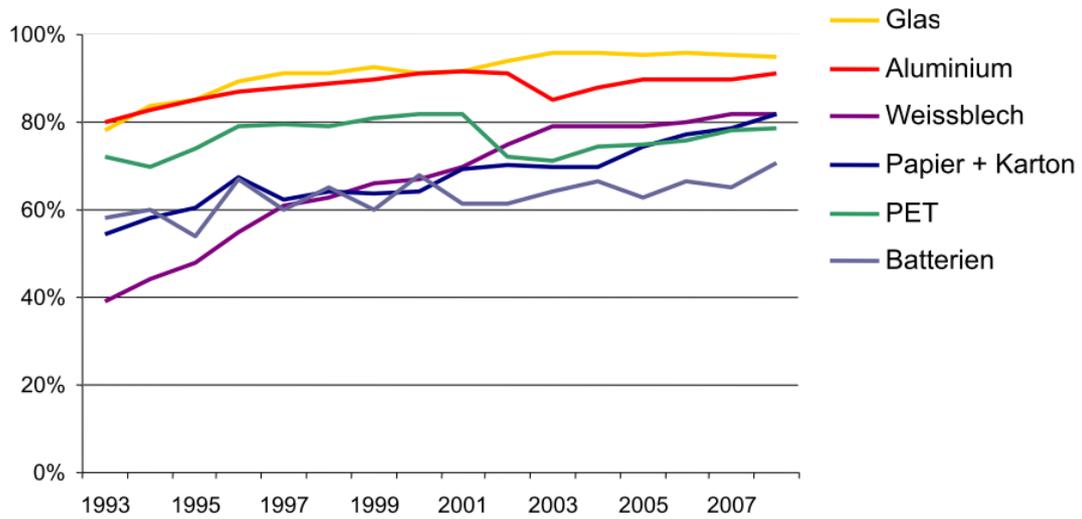
A-2 Entwicklung Siedlungsabfälle und BIP



BAFU 2013

Figur 22: Entwicklung des Anfalls von Siedlungsabfällen (gelb bis 1991, danach aufgeteilt in verbrannte und deponierte Anteile) und Anteil der verwerteten Siedlungsabfälle (grün) am Gesamtaufkommen. Die blaue Linie stellt das Bruttoinlandprodukt dar.

A-3 Entwicklung der Schweizer Separatsammlungsquoten

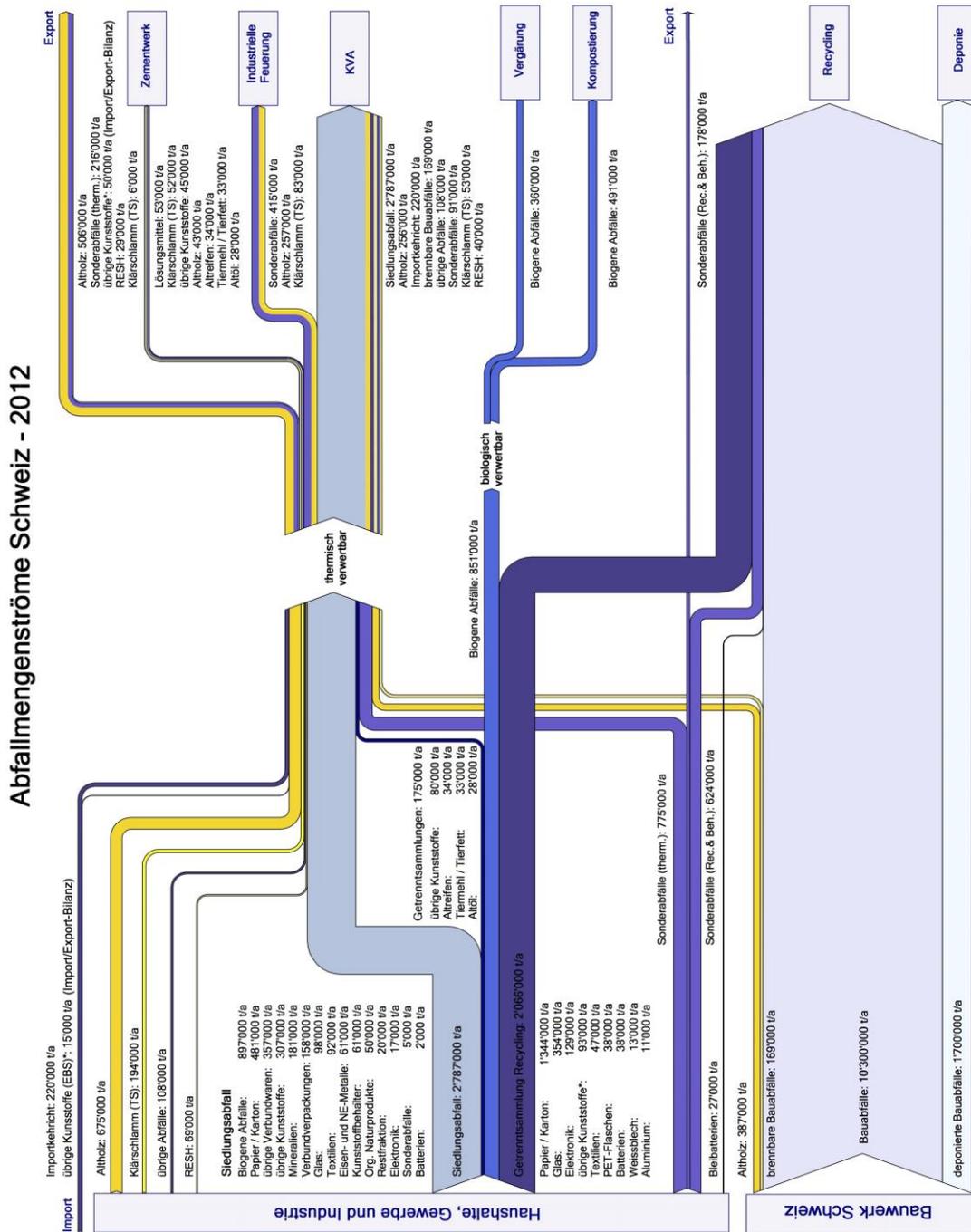


BAFU

Figur 23: Entwicklung der Recyclingquoten bis 2008. Hauptsächlich dank der gesteigerten Recyclingleistung konnte die Menge des thermisch zu behandelnden Siedlungsabfalls konstant gehalten werden.

A-4 Massenflüsse und Verwertungswege von Abfällen in der Schweiz

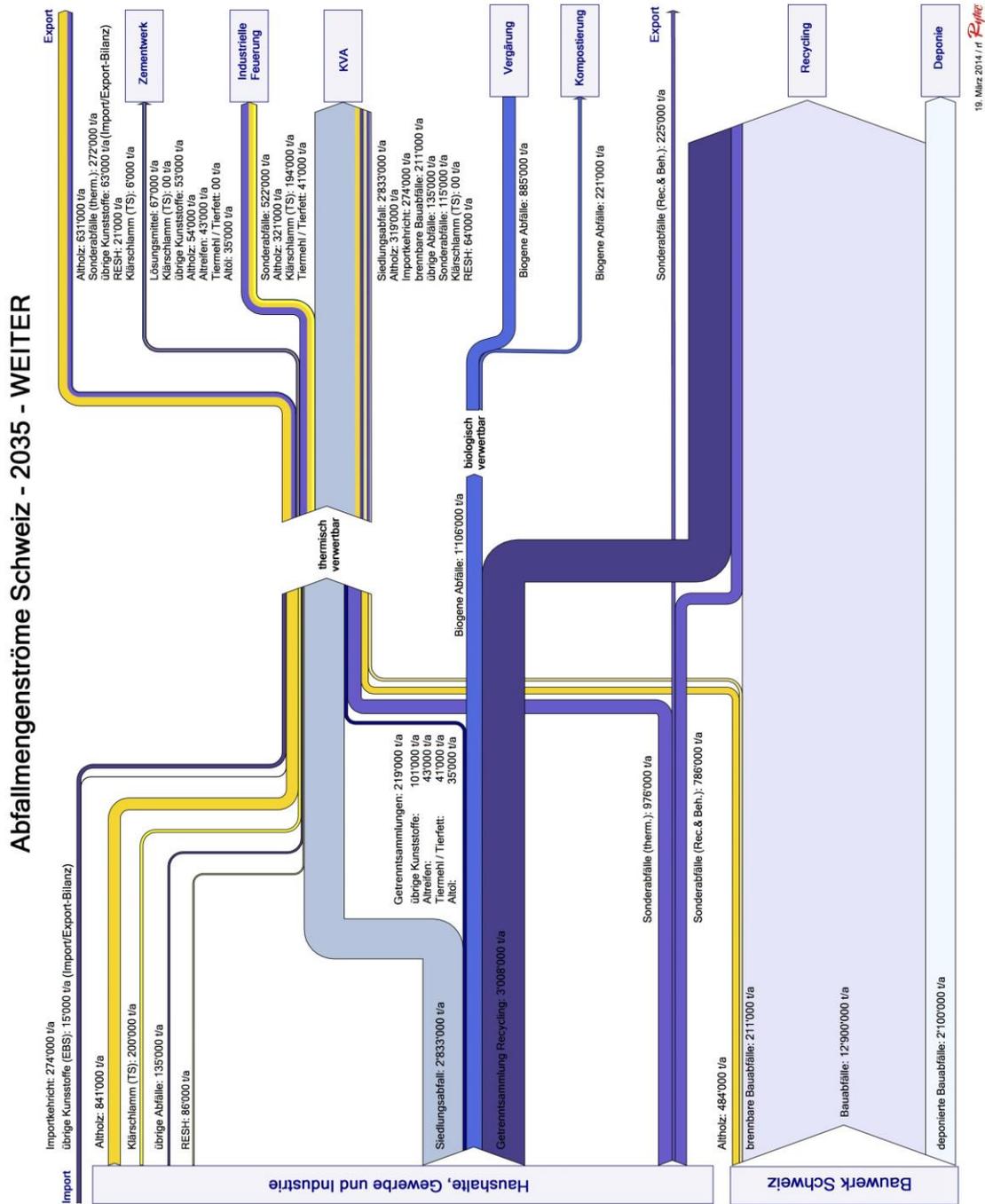
A-4.1 Massenfluss 2012



*Schätzung 2010 (Redio)
 Quellen: Oberbühler 2013, Sonderabfall aus jährlicher Mengenherhebung bei KVA (BAFU, Hg), Abfall aus Holzsperrholzelektronik (BEF) und Daten von BAUFU (HSG), Comenius Konvention, Biogas & Recycling auf
 Abfallstatistik BAFLU und Innotec, Sonderabfallstatistik BAFLU, Kompostierstatistik BAFLU, Klärschlammherhebung (BAFLU), Klärschlammherhebung (BAFLU), Kunststoffverwertung Schweiz (BAFLU, Redio)

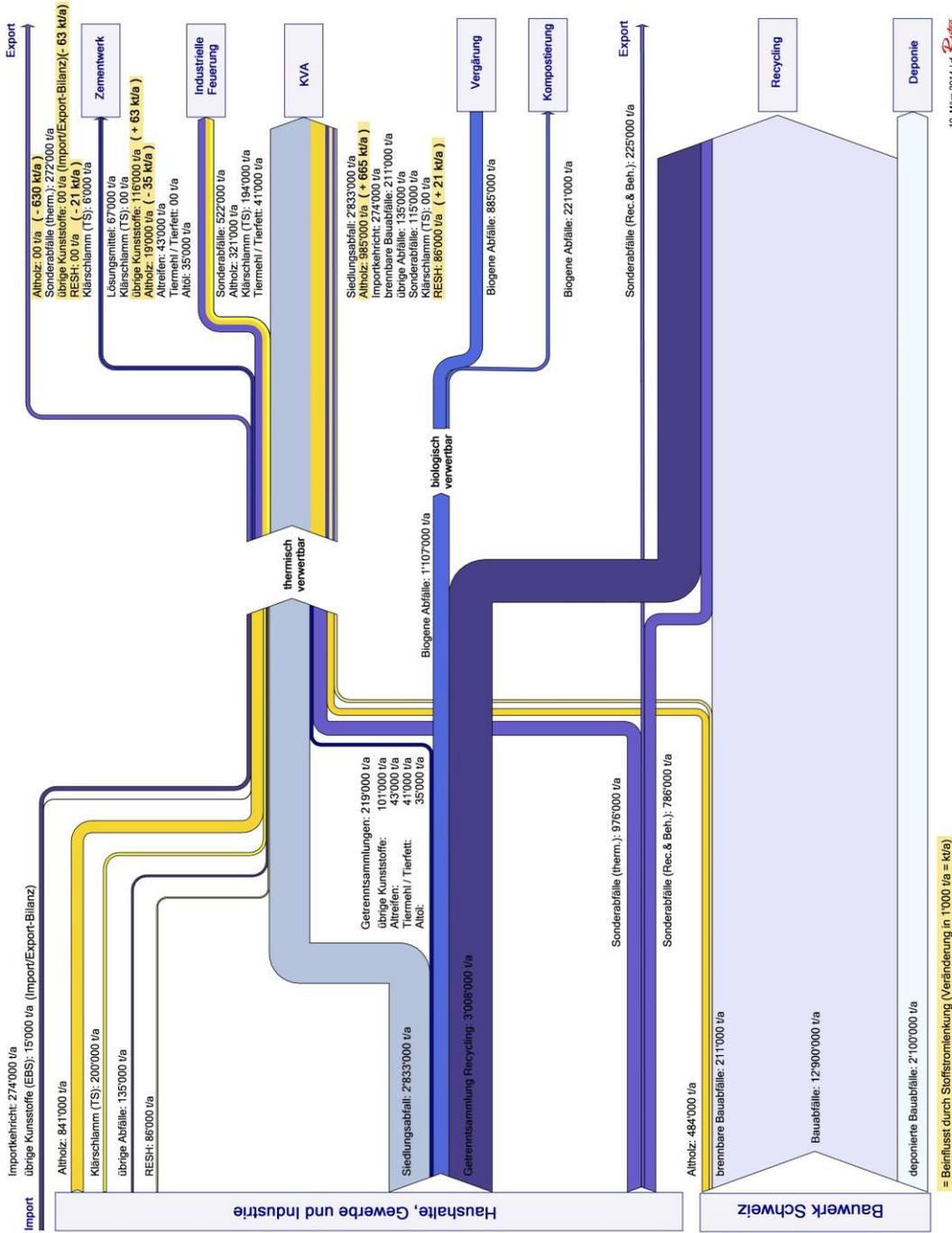
19. März 2014 / r Pytec

A-4.2 Massenfluss «Weiter wie bisher»

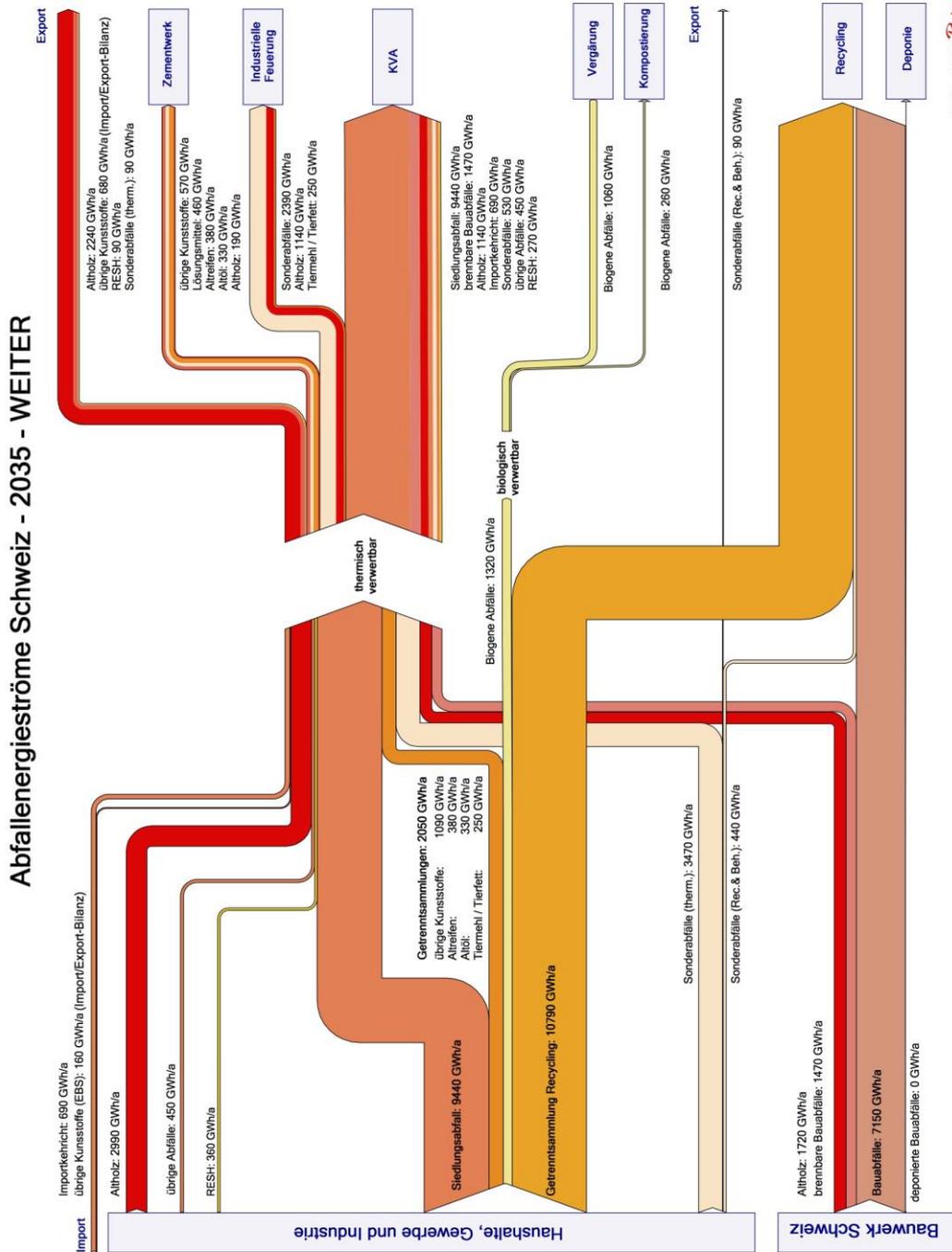


A-4.3 Massenfluss «optimierte Abfallwirtschaft»

Abfallmengenströme Schweiz - 2035 - OPTIMAL

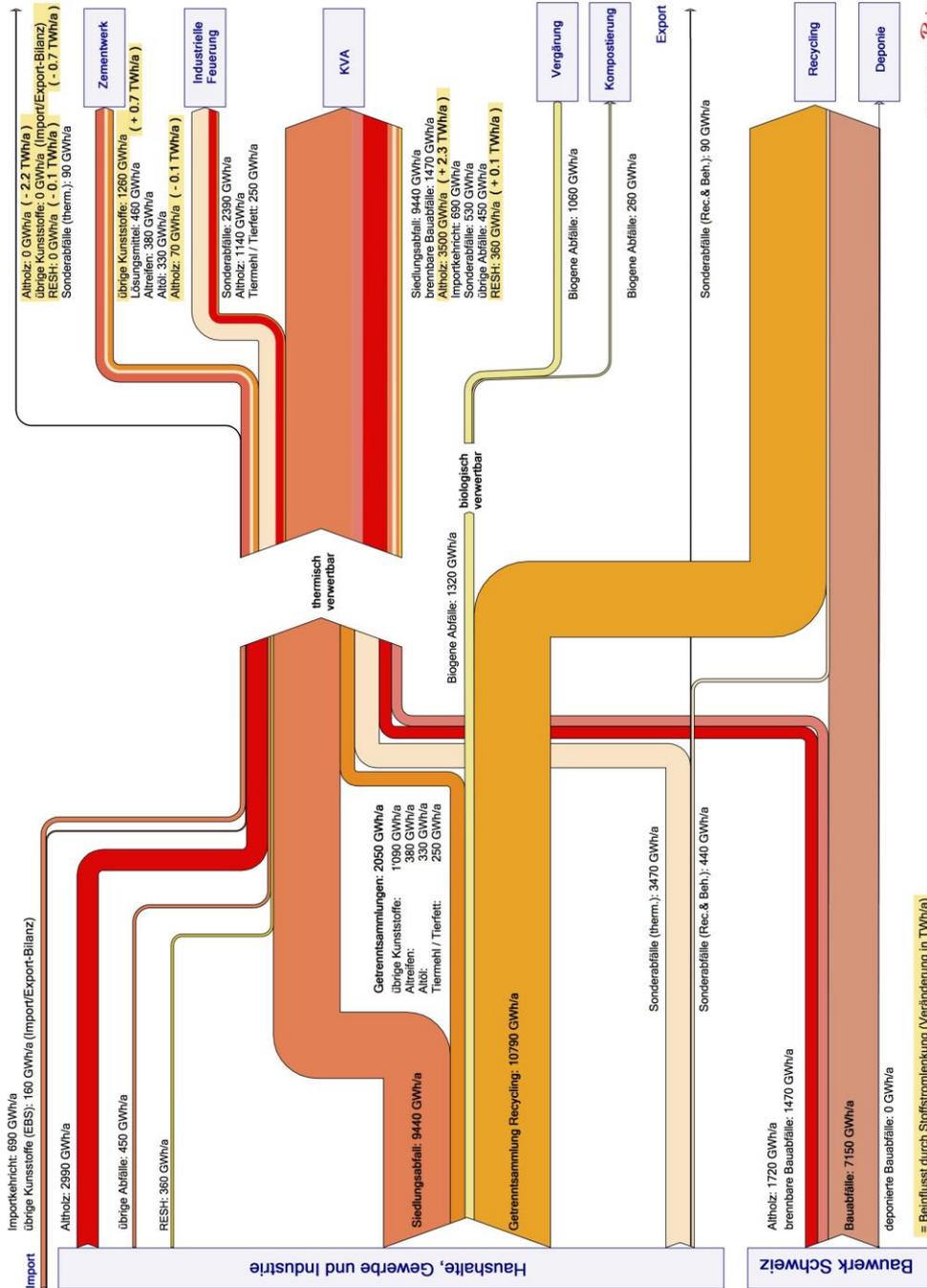


A-5.2 Energiefluss «Weiter wie bisher»

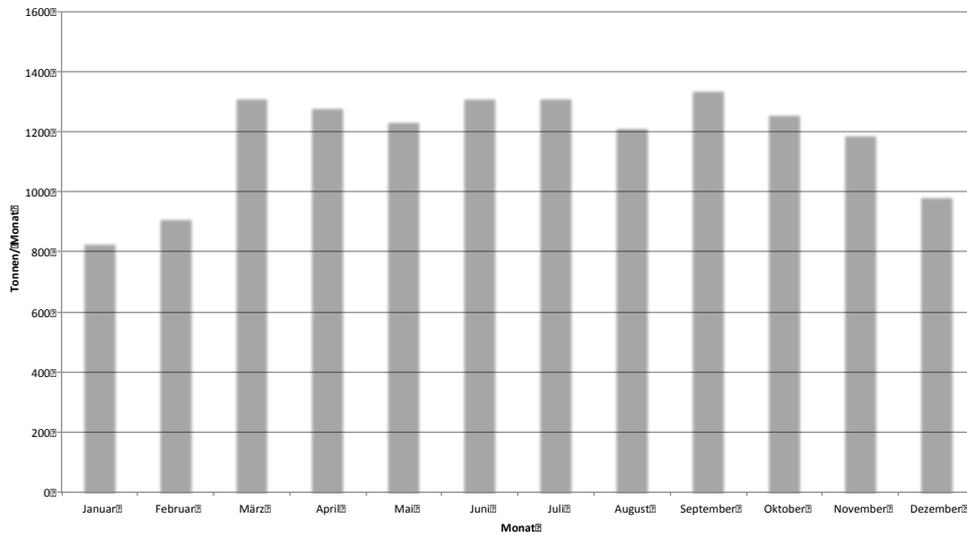


A-5.3 Energiefluss «optimierte Abfallwirtschaft»

Abfallenergieströme Schweiz - 2035 - OPTIMAL

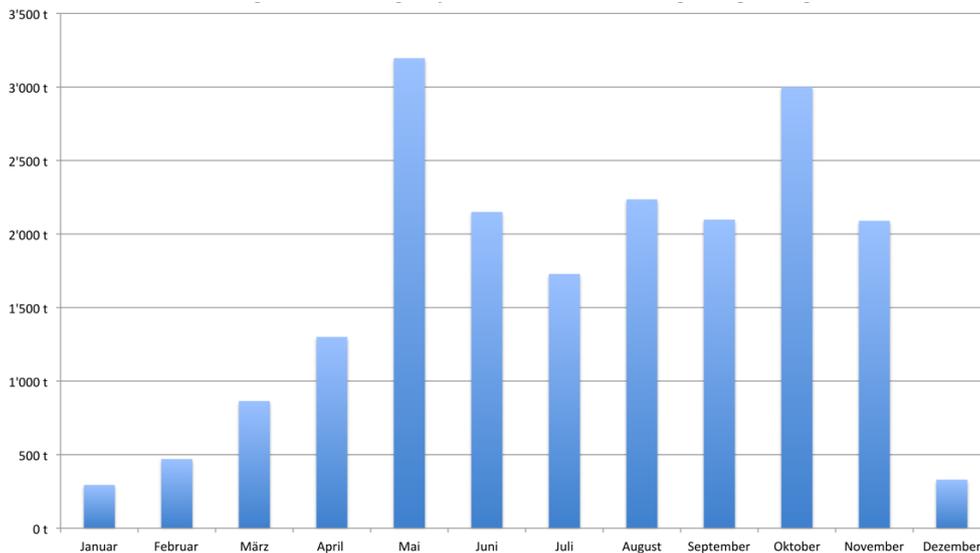


A-6 Angelieferte Abfallmengen im Jahresverlauf



Rytec

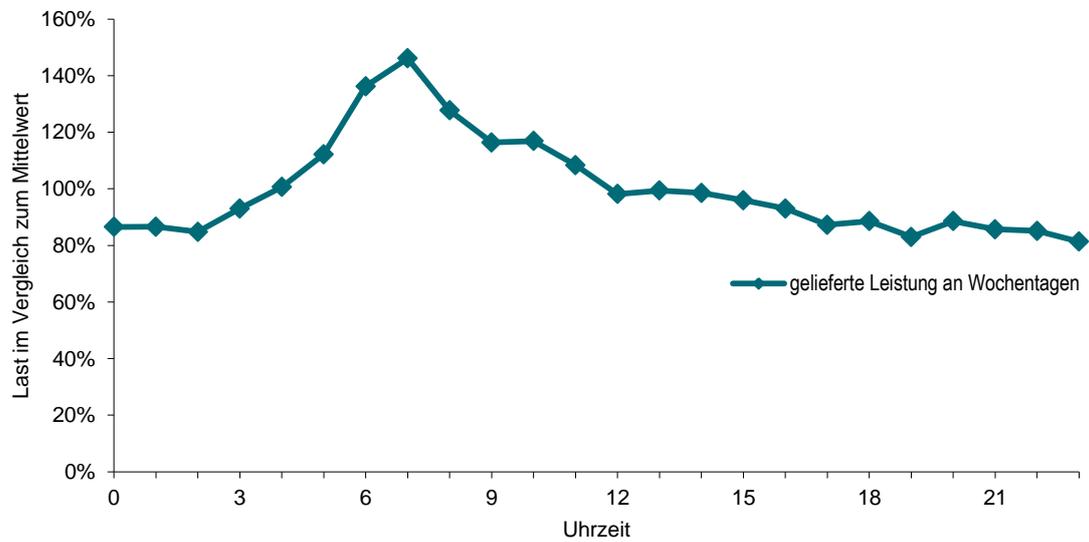
Figur 24: Beispielhafte Darstellung der monatlichen Anlieferungsmengen einer Schweizer Kehrichtverbrennungsanlage. Beachtenswert sind die Fehlmengen in den Wintermonaten (geringe Bautätigkeit).



Rytec

Figur 25: Beispielhafte Darstellung der Anlieferungsschwankungen einer Schweizer Vergärungsanlage (Monatswerte). Klar erkennbar sind die Muster der Grünflächenpflege im Frühling und Spätherbst.

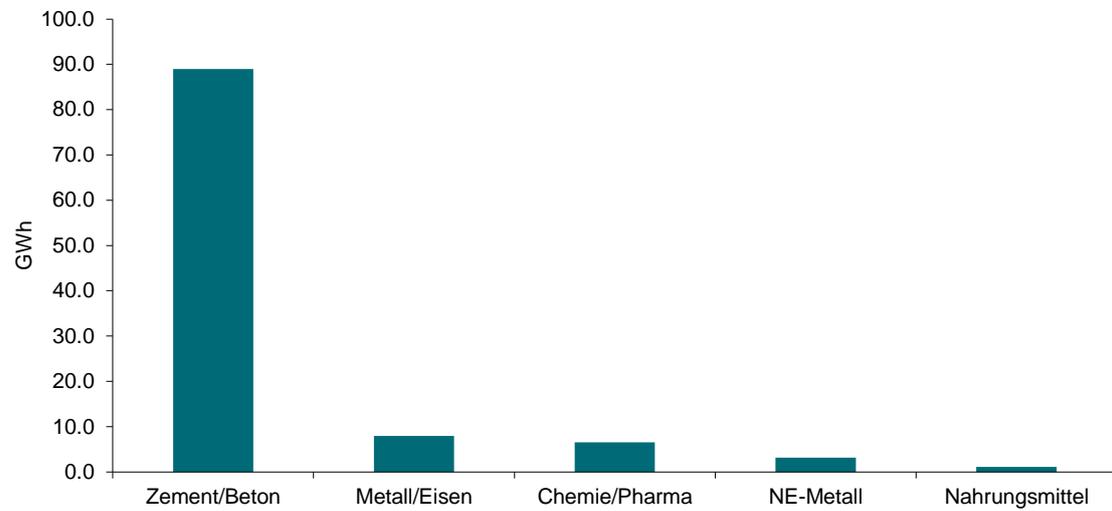
A-7 Tagesverlauf der Wärmenachfrage



Rytec

Figur 26: Typischer Tagesverlauf der gelieferten Leistung in % des Mittelwertes einer Fernwärmeversorgung ab KVA

A-8 Wärmeverbrauch pro Betrieb nach Industriebranchen



econcept

Figur 27: Durchschnittlicher Verbrauch von thermischer Energie pro Betrieb in ausgewählten energieintensiven Branchen 2012 (Bachmann 2013)

A-9 Jährliche CO₂-Emissionen von Industriebetrieben

Unternehmen	tCO ₂ /Jahr	Branche	Produktionsstandorte	Kommentar zum Abnahmepotential	B=bestehend X=prüfen
cemsuisse ²⁶	513'754	Zementindustrie	Eclépens, Cornaux, Péry, Wildegg, Siggenthal, Untervaz	Abfall als Rohstoff	B
CIMO SA	92'702	Chemie/Pharma	Monthey		x
Lonza AG	77'273	Chemie/Pharma	Visp, (Basel)		B (Visp)
Stahl Gerlafingen AG	73'185	Stahl	Gerlafingen	Benötigt Hochtemperaturwärme	
Perlen Papier AG	72'138	Papier	Perlen	Anschluss an KVA Perlen	(B) zukünftig
DSM Nutritional	65'138	Chemie/Pharma	Lalden, Vouvry, Gland, Aesch, Kaiseraugst, Sisseln, Schaffhausen		
Papierfabrik Utzenstorf AG	44'555	Papier	Utzenstorf	Eigene Reststoffverbrennung	x
Swiss Steel AG	41'548	Stahl	Emmenbrücke	Benötigt Hochtemperaturwärme	
Vetropack AG	41'516	Glas	St-Prex	Benötigt Hochtemperaturwärme	
F. Hoffmann-La Roche AG	41'345	Chemie/Pharma	Basel, Kaiseraugst, Rotkreuz, Schlieren	Bezieht Fernwärme ab KVA Basel	B
ALSTOM Technologie	39'620	Energie/Transport	Baden, Birr, Oberentfelden, Neuhausen a.R.	Gasturbinen-Prüfstand	
Flumroc AG	32'142	Dämmmaterialien	Flums, Ecublens	Benötigt Hochtemperaturwärme	x
Constellium Valais SA	28'614	Aluminium	Sierre, Chippis, Steg		
Zuckerfabriken Aarberg und Frauenfeld AG	28'543	Zucker	Aarberg		
ZZ Wancor	27'801	Baumaterialien	Istighofen, Laufen, Rafz	Benötigt Hochtemperaturwärme (Ziegelei)	x
BASF Kaisten AG	27'778	Chemie/Pharma	Kaisten		
Novelis	27'725	Aluminium	Sierre	Benötigt Hochtemperaturwärme	
Crema SA	27'213	Milchprodukte	Lausanne, Lucens, Thun		x
(Cham Paper Group)	(26'511)			Betrieb wird eingestellt	
Ziegler Papier AG	24'956	Papier	Grellingen		x
HOCHDORF Nutritec AG	24'232	Nahrungsmittel	Hochdorf		x
Kalkfabrik Netstal AG	20'850	Kalk/Kies	Netstal	Benötigt Hochtemperaturwärme	
Estavayer Lait SA	18'156	Milchprodukte	Estavayer-le-Lac		x
Nestlé Suisse S.A.	17'161		Orbe		

Tabelle 17: Die 25 grössten Energieverbraucher im Jahr 2012 gemäss dem nationalen Emissionshandelsregister

²⁶ Verband der Schweizerischen Zementindustrie: Holcim, Jura-Cement-Fabriken, Ciments Vigier, Juracime

A-11 Exergieberechnung detaillierte Daten

Exergie-Rechnung Anlagentypen optimal

Jahresdurchschnitt – OPTIMAL		Direkte Verbrennung (Zementwerk)	Industrielle Heizkraftwerke / Sonderverbrennungen	KVA im Industrieverbund (Typ 1)	Fernwärme-KVA in Bandlast (Typ 2)	Fernwärme-KVA mit saisonaler Betriebsweise (Typ 3a)	Strom-KVA (Typ 4)	Wärme/Strom-KVA mit ganzzahliger Vollausslastung (Typ 3)
Abfall	100% Exergie	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Umgebungstemperatur		7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50
Stromexport	100 % Exergie	2.5%	5.0%	5.0%	13.5%	15.0%	24.3%	16.4%
Bruttoleistung (+20% Eigenbed.)		3%	6%	6%	16%	18%	29%	20%
Wärmeexport		70.0%	70.0%	70.0%	61.5%	54.8%	0.0%	30.1%
Vorlauftemperatur [°C]		250.00	250.00	250.00	80.00	80.00	20.00	80.00
Rücklauftemperatur [°C]		130.00	130.00	130.00	60.00	60.00	10.00	60.00
Thermodynamische Mitteltemperatur [°C]		0.00	187.40	187.40	69.90	69.90	14.97	69.90
Temperatur		900.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Carnotfaktor	η_c	76.1%	39.1%	39.1%	18.2%	18.2%	2.6%	18.2%
Wärmeexport		5.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.4%	0.0%	6.0%
Vorlauftemperatur [°C]		50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
Rücklauftemperatur [°C]		30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Thermodynamische Mitteltemperatur [°C]		39.89	39.89	39.89	39.89	39.89	39.89	39.89
Carnotfaktor	η_c	10.3%	10.3%	10.3%	10.3%	10.3%	10.3%	10.3%
Anlagenwirkungsgrad								
Thermisch	$\eta_{A,th}$	0.75	0.70	0.70	0.62	0.57	0.00	0.36
Elektrisch	$\eta_{A,el}$	0.03	0.05	0.05	0.14	0.15	0.24	0.16
Gesamt	$\eta_{A,gesamt}$	0.78	0.75	0.75	0.75	0.72	0.24	0.53
Exergischer Anlagenwirkungsgrad								
Thermisch	$\eta_{A,exerg,th}$	0.54	0.27	0.27	0.11	0.10	0.00	0.06
Elektrisch	$\eta_{A,exerg,el}$	0.03	0.05	0.05	0.14	0.15	0.24	0.16
Gesamt	A exerg. gesamt	0.563	0.323	0.323	0.247	0.252	0.243	0.225

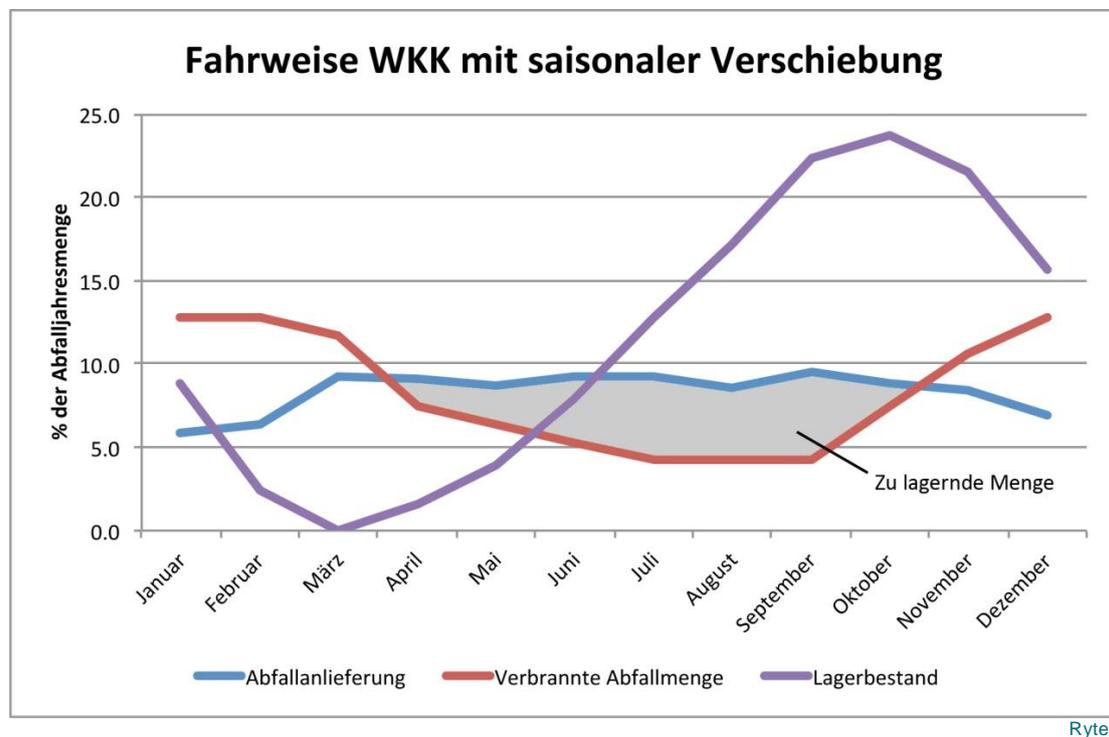
A-12 Saisonaler Betrieb einer KVA und Lagerbedarf

Beim KVA-Typ «Fernwärme-KVA mit saisonaler Betriebsweise (Typ 3a) kann die Feuerleistung und somit die Wärmeabgabe dem Fernwärmebedarf nachgefahren werden. Im Winter fährt die Anlage auf Überlast, im Sommer zeitweise nur im Einlinienbetrieb bei Teillast. Tabelle 18 zeigt die monatliche Feuerleistung für den saisonalen Betrieb.

	Jan	Feb	März	April	Mai	Jun	Jul	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
Feuerleistung [%]	120	120	110	70	60	50	40	40	40	70	100	120

Tabelle 18: Monatliche Feuerleistung einer Fernwärme-Anlage im saisonalen Betrieb.

Die Abfallmenge, welche in dieser Fahrweise nicht direkt verbrannt werden kann, muss gelagert werden und kann im Winter für die Überlastphase genutzt werden. Der Lagerbedarf beträgt knapp 25% der Abfalljahresmenge. Figur 28 zeigt die saisonalen Schwankungen einer typischen Abfallanlieferung in Schweizer KVA und den Lagerbedarf für das oben beschriebenen Verbrennungsregime.



Figur 28: Abfallanlieferung im Jahrgang und Abfallverbrennung die dem Fernwärmebedarf nachgefahren wird mit resultierendem Lagerbestand.

A-13 Schätzung Investitionskosten «optimierte Abfallwirtschaft» im Vergleich zu «Weiter wie bisher»

	Weiter wie bisher 2035			Optimierte Abfallwirtschaft 2035				Mehrinvestitionen
	Zubau neue Anlagen	Investitionen für Neuanlagen oder Sanierungen	Investitionen für Optimierungsmassnahmen	Zubau neue Anlagen	Optimierungsmassnahmen bestehende Anlagen	Investitionen für Neuanlagen oder Sanierungen	Investitionen für Optimierungsmassnahmen	
	Anz.	Mio. CHF	Mio. CHF	Anz.	Anz.	Mio. CHF	Mio. CHF	Mio. CHF
Massnahmenbündel/Anlagen								
Optimierung der Anlagen (Einzelmassnahmen)								
Lenkung der Abfallströme								
SV01 National koordinierte, regionale Planung							n.k.	
SZ03 Umladestationen			20				60	
Sortieranlage			100				300	
SG01 Import/Export aus Energiesicht steuern							n.k.	
SG02 Exporte von energiereichen Abfällen regulieren							n.k.	
AZ04 Überkapazitäten / Reserven bewirtschaften							n.k.	
Total Investitionen		0	120			0	360	240
Zementwerke								
	0	keine		0	6	keine		
Installierung ORC-Turbinen							63	
Einrichtung Tieftemperaturnutzung							30	
Total Investitionen		0	0			0	93	93
Industrielle Heizkraftwerke								
	8	558		9	26	605		
AT06 Stromproduktion in industriellen Heizkraftwerken steigern							70	
SV04 Energiefokus in der Abfalltrennung							50	
SV03 Ersatzbrennstoffe			10				45	
Total Investitionen		558	10			605	165	202
KVA im Industrieverbund (Typ 1)								
	0	600		0	3	450		
AO01 zentrale grosse Anlagen							enth.	
NO01 Industriecluster für energieintensive Betriebe (Kosten für Erschliessung/Standortwechsel)							30	
Erschliessung mit Ferndampfleitungen				65 km			134	

	Weiter wie bisher 2035		Optimierte Abfallwirtschaft 2035					
Total Investitionen		600	0			450	164	14
Fernwärme-KVA in Bandlast (Typ 2)								
	0	900		0	5	1'050		
NZ01 Optimierungen in Fernwärmenetzen							146	
AZ01 grosse Wärmespeicher errichten							20	
Aufbau Fernwärmenetze	30 km		66	170 km			337	
Total Investitionen		900	66			1'050	503	587
Fernwärme-KVA, saisonale Betriebsweise (Typ 3a)								
	-2	800		0	6	600		
SZ01 Abfalllager							15	
SV02 Dynamische Zuordnung							BK	
SZ04 Ausgleich unter flexiblen Anlagen							BK	
AT04 Nutzung latente Wärme im Rauchgas							18	
AT05 LuKo-Abwärme für Anergienutzungen							30	
AO02 Dezentrale kleine Anlagen							keine	
AZ02/03 Dampfproduktion flexibilisieren und Turbine							BK	
NT01 Anergienetze aufbauen				85 km			258	
NT02 Tieftemperatur-Energienutzung (Fischzucht, Gewächshaus)							n.k.	
Total Investitionen		800	0			600	321	121
Strom-KVA (Typ 4)								
	3	1'080		-1	5	1'350		
AO01 zentrale grosse Anlagen							enth.	
AT02 Einrichtung Flusswasserkühlung							75	
AT04 Nutzung latente Wärme im Rauchgas							15	
Neu: Erhöhung der Dampfparameter							n.k.	
Neu: Mehrstufige Kondensat / Speisewassererwärmung							enth.	
Total Investitionen		1'080	0			1'350	90	360
Rückbau von Anlagen								
Total Investitionen		60				300		240
Gesamttotal		4'000	200			4'350	1'700	1'860

Tabelle 19 Schätzung der Investitionskosten für «Weiter wie bisher» und «optimierte Abfallwirtschaft», detaillierte Kostenzusammenstellung. Preisniveau des Jahres 2013

* Der Wert wird noch ermittelt.

Abkürzungen: enth.: Kosten enthalten; n.k.: nicht kostenrelevant bez. Investitionskosten; BK: Betriebskosten

A-14 Energieströme und Energieproduktion für 2012 und die Szenarien «Weiter wie bisher» und «Optimal»

