

Schlussbericht **März 2005**

# Anleitung mit Checkliste zur Energieoptimierung von Kehricht- verbrennungsanlagen

## Schlussbericht

ausgearbeitet durch

Dr. S. Egli  
S&A Engineering AG  
Rheinweg 9  
8200 Schaffhausen

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Weitere Informationen über das Programm „Elektrizität“ des Bundesamts für Energie stehen auf folgender Web-Seite zur Verfügung:  
[www.electricity-research.ch](http://www.electricity-research.ch)

# Inhaltsverzeichnis

Seite

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>2</b>
<b>Summary .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Grundlagen der Energieproduktion in Kehrichtverbrennungsanlagen.....</b>	<b>7</b>
2.1 Einleitung .....	7
2.2 Stromerzeugung in Kehrichtverbrennungsanlagen – bestimmende Faktoren.....	7
2.3 Stromerzeugung in bestehenden Anlagen .....	8
2.4 Elektrische Verbraucher in Kehrichtverbrennungsanlagen .....	10
<b>3. Vorgehen bei der Energieoptimierung von Kehrichtverbrennungsanlagen .....</b>	<b>11</b>
3.1 Mögliche Vorgehensweisen .....	11
3.2 Die Vorgehensstufen der Energieoptimierung .....	12
<b>4. Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energie-optimierungsmassnahmen.....</b>	<b>13</b>
<b>5. Ansatzpunkte zur Reduktion des Energieverbrauchs .....</b>	<b>14</b>
5.1 Abfalltransport und -zerkleinerung .....	14
5.2 Feuerung .....	14
5.3 Rauchgasreinigung .....	15
5.3.1 Saugzüge .....	15
5.3.2 Rauchgasaufheizung Katalytische Entstickung.....	16
5.3.3 Weitere wesentliche Verbraucher Rauchgasreinigung .....	16
5.4 Abhitzekessel, Thermische Anlagen .....	17
5.5 Abwasserbehandlung .....	17
5.6 Nebenanlagen.....	17
5.7 Gebäudetechnische Anlagen (Lüftungs-, Kühl- und Klimaanlagen) .....	17

## Verzeichnis der Abbildungen

Seite

Abbildung 1:	Entwicklung der Energieproduktion der Schweizer Kehrichtverbrennungsanlagen zwischen 1990 und 2000 [1].....	5
Abbildung 2	Entwicklung des spezifischen Stromeigenverbrauchs und der installierten elektrischen Leistung in Schweizer KVA's zwischen 1990 und 2000 [1] .....	5
Abbildung 3:	Entwicklung des Jahresnutzungsgrades (rote Kurve: produzierte Energie = Strom + Wärme, blaue Kurve: verkaufte Energie) in Schweizer KVA's zwischen 1990 und 2000 [1] .....	6
Abbildung 4:	Energiebilanz Kehrichtverbrennungsanlage .....	7
Abbildung 5	Entwicklung des Wirkungsgrad der Stromerzeugung in Schweizer KVA's zwischen 1990 und 2002 . Berechnete Werte bei reiner Verstromung aus Daten [1]. .....	9
Abbildung 6:	Berechneter Brutto-Wirkungsgrad der Stromerzeugung bei reiner Verstromung und spezifischer Stromverbrauch der Schweizer KVA's im Jahr 2000 [10]. .....	9
Abbildung 7:	Leistungsregelung bei Radial-Ventilatoren.....	15

## Anhänge

Anhang 1	Massnahmenkatalog und Checklisten
Anhang 2	Definitionen Kennwerte und Wirkungsgrade
Anhang 3	Übersicht elektrische Verbraucher in Kehrichtverbrennungsanlagen – geordnet nach Nennleitung und Anlagenbereich
Anhang 4	Nennleistungsdaten Elektromotoren
Anhang 5	Einsatz von Softwarewerkzeugen zur energetischen Optimierung
Anhang 6	Bestandesaufnahme und Möglichkeiten der Energieeinsparung bei Pumpensystemen
Anhang 7	Möglichkeiten der Verbrauchseinsparung bei Druckluftanlagen

## Zusammenfassung

In Kehrichtverbrennungsanlagen erfolgt die Energienutzung durch Dampferzeugung in einem Abhitzekessel. Im Kessel übertragen die heissen Rauchgase unter gleichzeitiger Abkühlung die Energie an den in Rohren geführten Dampf. Der erzeugte Dampf wird zur Stromerzeugung mittels Dampfturbine und Generator sowie zur FernwärmeverSORGUNG (Dampf und/oder Heisswasser) genutzt. Der erzeugte Strom wird einerseits ins Netz eingespiesen und andererseits zur Deckung des Eigenbedarfs der elektrischen Verbraucher der Anlage genutzt.

Der energetische Gesamtwirkungsgrad der einzelnen Anlagen schwankt zwischen 20 % bei reiner Stromerzeugung und über 70 % bei kombinierter Stromerzeugung und ganzjähriger Wärmenutzung. Eine grobe Auswertung der vorhandenen statistischen Daten der Schweizer KVA's zeigt, dass sowohl bei der Stromerzeugung als auch bei der Fernwärme ein erhebliches Optimierungspotential besteht. Bei der Stromerzeugung besteht sowohl beim Eigenbedarf als auch beim Wirkungsgrad der Stromerzeugung ein erhebliches Optimierungspotential.

Der vorliegende Bericht beinhaltet eine Zusammenstellung möglicher Ansätze zur energetischen Optimierung in Kehrichtverbrennungsanlagen sowie einen Massnahmenkatalog mit Checklisten zu den einzelnen Anlagenbereichen, mit Hilfe derer systematisch Verbesserungsmassnahmen evaluiert werden können. Die Checklisten stellen somit ein Hilfsmittel zur schnellen Abschätzung des Optimierungspotential dar.

## Résumé

Dans les usines thermiques de traitement des ordures, l'énergie est utilisée par production de vapeur dans une chaudière de récupération. Dans la chaudière les gaz de combustion transfèrent l'énergie à la vapeur d'eau qui est conduite dans les tubes. La vapeur vive produite on utilise pour la production d'électricité dans la turbogroupe et pour le chauffage à distance. L'électricité est vendue au réseau et couvre la propre consommation.

Le rendement énergétique des usines varie entre 20 % pour la production d'électricité pure et 70 % pour la production de chaleur et d'électricité combinée.

Une analyse approximative des données statistiques des usines thermiques de traitement des ordures Suisses montre lors de la production d'électricité aussi bien que lors de l'utilisation de chauffage à distance une possibilité d'optimisation considérable.

La production d'électricité peut être améliorée par la diminution de la consommation d'énergie aussi bien que par l'augmentation du rendement électrique.

Le présent rapport comprend une composition d'approches possibles pour l'optimisation énergétique ainsi qu'une série de mesures et de listes de contrôle pour les différents secteurs d'installation.

Les listes de contrôle permettent d'estimer systématiquement et rapidement les possibilités d'optimisation.

## Summary

In municipal waste treatment plants energy is produced by burning the waste in a boiler. The hot flue gases from the boiler are cooled when they transfer their heat energy to steam passing through nearby pipes. This heated steam, in turn, not only transfers its energy to a turbogenerator to produce electricity, but is also used for district heating (hot water and/or steam). The electricity from the turbogenerator is used for the plant's own needs and surplus power is sold to the public grid.

The overall energy efficiency of individual plants vary from under 20 % for pure generation of electricity to over 70 % for combined heat and power generation and year-round utilisation of heat. A rough evaluation of the existing statistical data of Swiss waste treatment plants shows that both the generation of electricity and implementation of district heating have a considerable potential for optimisation.

The generation of electricity has a considerable optimisation potential realisable by not only lowering the plant's own electricity consumption, but also by increasing the efficiency of the electricity generation itself.

This report offers a summary of solutions for overall optimisation and provides a catalogue of measures including checklists for the individual plant areas, allowing improvement measures to be systematically determined. The checklists are thus an aid allowing fast estimation of the optimisation potential.

# 1. Einleitung

Nach dem Inkrafttreten des Deponieverbots für brennbare Abfälle im Jahr 2002, werden diese in der Schweiz nun vollständig in den bestehenden 29<sup>1</sup> Kehrichtverbrennungsanlagen verbrannt und zur Energieerzeugung genutzt. Im Jahr 2002 lag die verbrannte Abfallmenge bei ca. 3.01 Mio t. Die KVA's produzierten daraus insgesamt 2'640 GWh Wärme und 1'426 GWh Strom. Der Jahresnutzungsgrad lag bei 39 % [1].

Der Beitrag der KVA's zum Schweizerischen Energieendverbrauch lag im Jahr 2000 bei 1.84 % [2]. Berücksichtigt man, dass ca. 50 % des in KVA's verbrannten Abfall erneuerbar sind, so stellt die Energieproduktion in KVA's nach der Wasserkraft die wichtigste erneuerbare Energiequelle dar.

In den letzten 10 Jahren nahm die verbrannte Abfallmenge und der Heizwert des Abfalls und damit auch die in KVA's produzierte Wärme und elektrische Energie deutlich zu (vgl. Abbildung 1). Gleichzeitig stieg aber auch der spezifische Stromeigenverbrauch stark an (vgl. Abbildung 2) und der Jahresnutzungsgrad bezogen auf die verkaufte Energie stagnierte bzw. sank zwischen 1996 und 2000 sogar wieder leicht (vgl. Abbildung 3).

Der Anstieg des Stromeigenbedarfs ist auf den erhöhten technischen Stand der Anlagen aufgrund verschärfter Auflagen zur Luftreinhaltung und erhöhter Anforderungen an die Reststoffentsorgung zurückzuführen.

Für die nächsten 10 Jahre gehen die Prognosen von stagnierenden Abfallmengen und gleichbleibendem Heizwert aus [3]. Gleichzeitig dürften als Folge der Strommarktliberalisierung die Stromvergütungen eher sinken. **Damit die jährlich in Form von Abfall anfallende, teilweise erneuerbare Energie auch in Zukunft optimal genutzt wird, müssen vermehrte Anstrengungen unternommen werden. Dies bedeutet Optimierung der bestehenden Anlagen und vermehrte Beachtung der Energieeffizienz bei der Planung von Anlagenerneuerungen.**

Der vorliegende Bericht konzentriert sich auf die Optimierung des Stromverbrauchs und der Stromerzeugung in Schweizerischen Kehrichtverbrennungsanlagen. Er soll dem Betreiber als Instrument zur Abschätzung von Optimierungsmöglichkeiten dienen.

---

<sup>1</sup> Im Jahr 2002 standen 28 KVA's im Betrieb. Im Jahr 2004 nahm die KVA Thun den Betrieb auf.

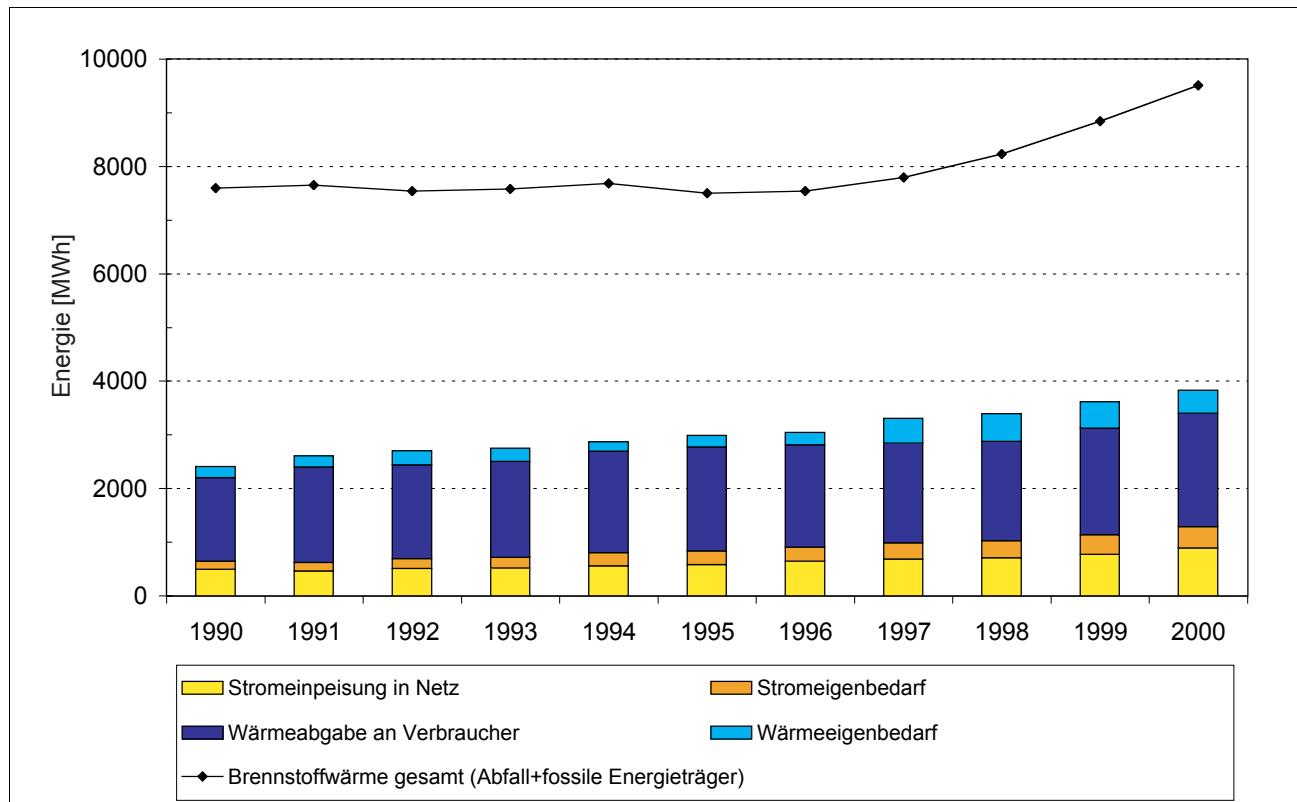


Abbildung 1: Entwicklung der Energieproduktion der Schweizer Kehrichtverbrennungsanlagen zwischen 1990 und 2000 [1]

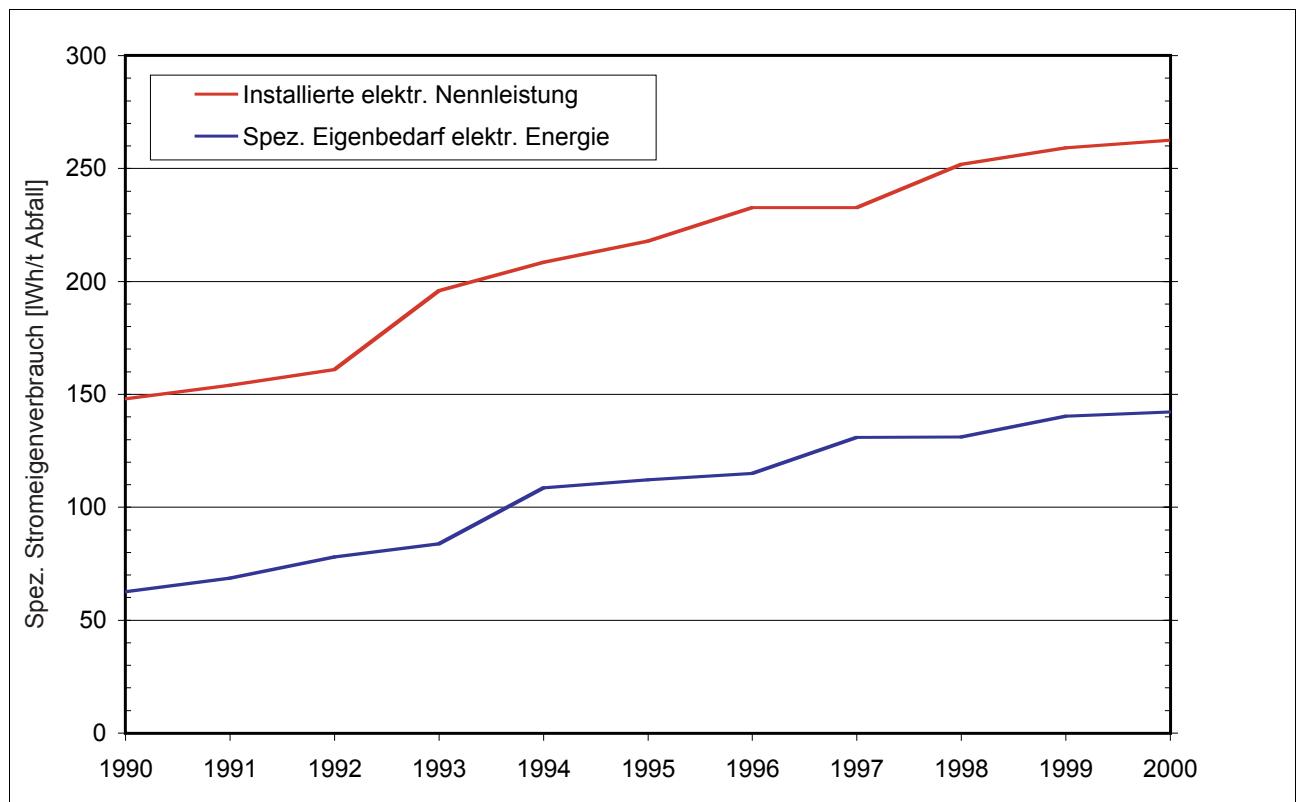


Abbildung 2 Entwicklung des spezifischen Stromeigenverbrauchs und der installierten elektrischen Leistung in Schweizer KVA's zwischen 1990 und 2000 [1]

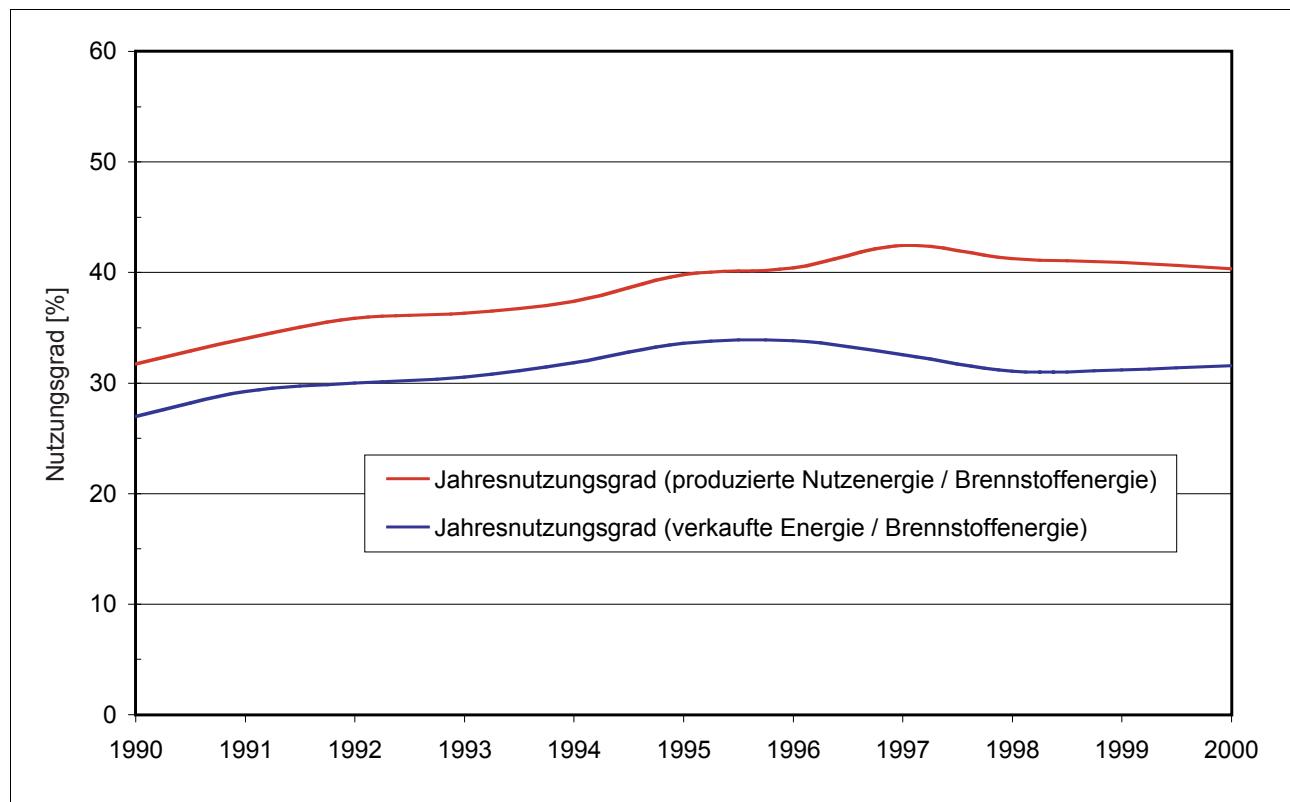


Abbildung 3: Entwicklung des Jahresnutzungsgrades (rote Kurve: produzierte Energie = Strom + Wärme, blaue Kurve: verkaufte Energie) in Schweizer KVA's zwischen 1990 und 2000 [1]

## 2. Grundlagen der Energieproduktion in Kehrichtverbrennungsanlagen

### 2.1 Einleitung

Die Energieproduktion erfolgt bei allen Kehrichtverbrennungsanlagen durch Dampferzeugung in einem Abhitzekessel. Die heissen Rauchgase übertragen dabei im Kessel unter gleichzeitiger Abkühlung die Wärme an den in Rohren geführten Dampf.

In den meisten Kehrichtverbrennungsanlagen wird mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) Wärme und Strom erzeugt. In 5 Anlagen wird die Energie nur zur Stromerzeugung genutzt.

An dieser Stelle soll nicht im Detail auf die technischen Grundlagen eingegangen werden. Es sei darum auf die Fachliteratur verwiesen [4-6].

Definitionen wichtiger Begriffen im Zusammenhang mit der Energieproduktion in Kehrichtverbrennungsanlagen sind in [7,8] und in Anhang 2 enthalten.

Abbildung 4 zeigt schematisch die Energiebilanz einer Kehrichtverbrennungsanlage.

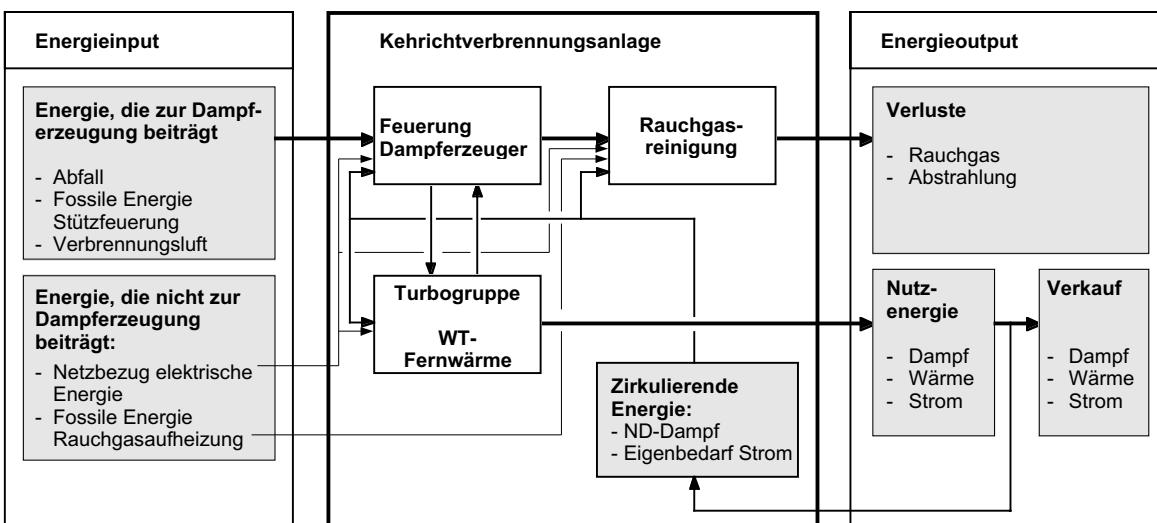


Abbildung 4: Energiebilanz Kehrichtverbrennungsanlage

### 2.2 Stromerzeugung in Kehrichtverbrennungsanlagen – bestimmende Faktoren

In den Schweizerischen Kehrichtverbrennungsanlagen dominieren bei der Stromerzeugung Kondensationsturbinen (reine Stromerzeugung) bzw. Entnahme-Kondensationsturbinen.

Im Fall der Kondensationsturbine besteht der Dampfturbinenprozess aus den Komponenten Dampfkessel, Turbine, Kondensator und Kesselspeisepumpe.

Der thermische Wirkungsgrad des einfachen Kreisprozesses hängt im wesentlichen vom Frischdampfzustand, den Kondensationsbedingungen und dem inneren Wirkungsgrad der Turbine ab. Bei Frischdampfparametern von 400 °C und 40 bar und einem Abdampfdruck von 0.05 bar liegt der thermische Wirkungsgrad bei ca. 36 %.

Die tatsächlich erzeugte elektrische Energie ist aufgrund zahlreicher Verluste erheblicher geringer als der thermische Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad der Stromerzeugung (sog. Stromausbeute  $\beta$ ) liegt bei den genannten Parametern bei ca. 22 %. Detaillierte Angaben zur Berechnung des Wirkungsgrads der Stromerzeugung sind in Anhang 2 enthalten.

Durch Erhöhung der Dampftemperatur sowie durch Senkung des Abdampfdruckes kann der Wirkungsgrad erhöht werden. Bei Abfallverbrennungsanlagen wird im Gegensatz zu fossil beheizten Kraftwerken oder nuklearen Kernkraftwerken die maximale Dampftemperatur durch die bei hohen Temperaturen verstärkt auftretende Korrosion begrenzt. Bei den meisten Schweizer KVA's liegen die Frischdampfparameter deshalb bei 40 bar und 400 °C. Ausnahmen bilden die folgenden Anlagen:

- |                                |                  |
|--------------------------------|------------------|
| - Gamsen, Dietikon und Monthey | 50 bar, 400 °C   |
| - Bern                         | 60bar, 475 °C    |
| - Biel                         | 20bar, 350 °C    |
| - Bazenheid                    | Sattdampf 20 bar |

Bei erhöhter Vergütung der produzierten elektrischen Energie können erhöhte Dampfparameter wirtschaftlich sein [9]. Inwieweit sich solche Anlagenkonzepte bewähren, werden die Betriebserfahrungen zeigen müssen.

Der Absenkung des Abdampfdruckes stehen steigende Kosten für den Kondensator entgegen.

## 2.3 Stromerzeugung in bestehenden Anlagen

Auf Basis der vom BfE veröffentlichten Daten zur Energieerzeugung in KVA's [1] kann die Entwicklung der Stromerzeugung verfolgt werden. Diese zeigen zwischen 1990 und 2002 eine Zunahme des mittleren Bruttowirkungsgrades und des mittleren Nettowirkungsgrades der Stromerzeugung (Stromproduktion - Stromeigenbedarf). Da die Stromerzeugung bei der Wärme-Kraft-Kopplung durch Wärmenutzung beeinflusst wird, muss der Wirkungsgrad bei reiner Stromerzeugung berechnet werden. So ist ein exakter Vergleich ohne Beeinflussung durch unterschiedliche Wärmenutzung möglich. Die Auswertung ist in Abbildung 5 dargestellt.

Mit knapp 18 % lag die Stromausbeute (Wirkungsgrad der Stromerzeugung bei reiner Verstromung) immer noch deutlich unter dem technisch möglichen Wert von ca. 22-23 %. Die Wirkungsgrade schwanken dabei zwischen den Anlagen sehr stark und liegen teilweise bei unter 15 % Stromausbeute.

Die Stromausbeute stieg zwischen 1990 und 2000 von ca. 12 auf ca. 18 % an. Der Nettoverstromungswirkungsgrad erhöhte sich dagegen im gleichen Zeitraum lediglich von ca. 10 auf 13 %. Der Grund hierfür ist in der starken Zunahme des spezifischen Stromeigenbedarfs von ca. 62 auf ca. 142 kWh/t zu suchen (vgl. Abbildung 2). Dies zeigt deutlich, dass bei der Energieoptimierung von Kehrichtverbrennungsanlagen in erster Linie beim Energieverbrauch und nicht bei der Produktion angesetzt werden muss. Dies umso mehr, als die Stromerzeugung in KVA's in der Regel nicht durch einfache Optimierungsmassnahmen, sondern meist nur im Rahmen von Anlagenerneuerungen verbessert werden kann. Zu beachten ist, dass es sich bei den genannten Zahlen um Mittelwerte aller KVA's handelt. Die Werte schwanken zwischen ca. 100 kWh/t und über 300 kWh/t [10]. In Abbildung 6 sind der spezifische Stromverbrauch und der Wirkungsgrad der Stromerzeugung bei reiner Verstromung der Schweizer KVA's für das Jahr 2000 dargestellt.

Da alle Anlagen den gesetzlichen Auflagen bezüglich Luftreinhaltung und Reststoffentsorgung genügen müssen, können die Unterschiede nicht auf den unterschiedlichen technischen Stand der Anlagen zurückgeführt werden. Es ist im Gegenteil sogar festzustellen, dass die neueren Anlagen zu denjenigen mit dem tiefsten spezifischen Stromeigenbedarf gehören.

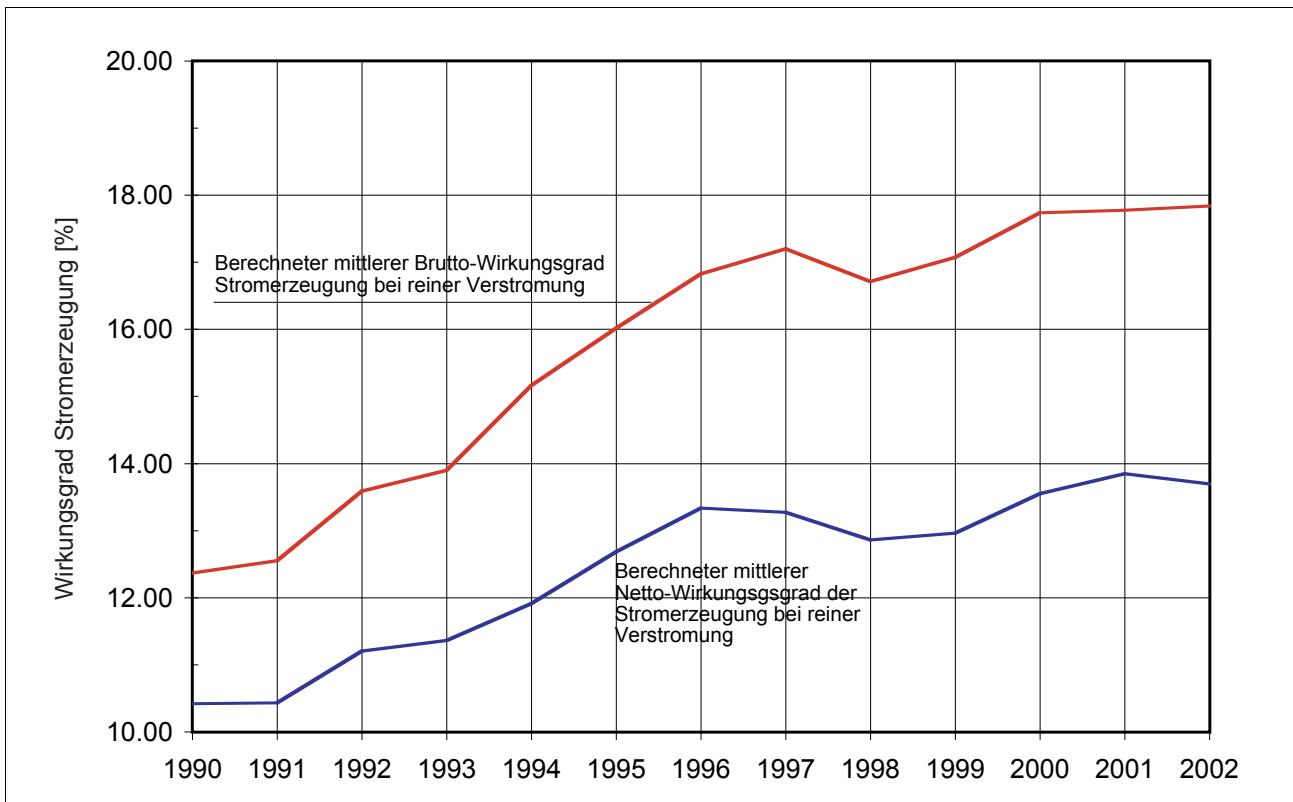


Abbildung 5 Entwicklung des Wirkungsgrad der Stromerzeugung in Schweizer KVA's zwischen 1990 und 2002 . Berechnete Werte bei reiner Verstromung aus Daten [1].

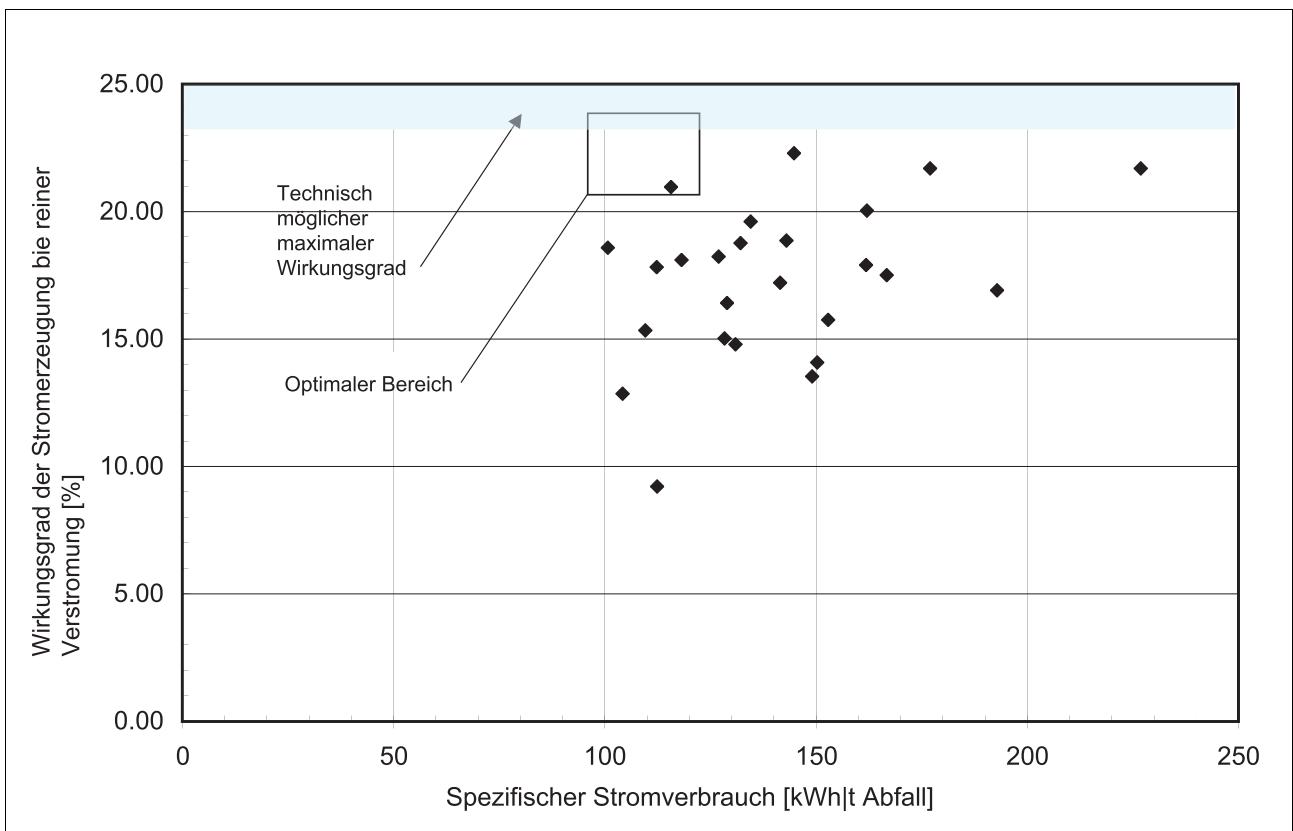


Abbildung 6: Berechneter Brutto-Wirkungsgrad der Stromerzeugung bei reiner Verstromung und spezifischer Stromverbrauch der Schweizer KVA's im Jahr 2000 [10].

## 2.4 Elektrische Verbraucher in Kehrichtverbrennungsanlagen

Bei reiner Stromerzeugung (das heisst keine Auskopplung von Fernwärme) können aus 1 Tonne Abfall ca. 660 kWh elektrische Energie erzeugt werden (Annahme für Wirkungsgrad der Stromerzeugung: 20 %). Der mittlere Stromeigenbedarf von 140 kWh/t beträgt somit ca. 21 % der erzeugten elektrischen Energie. Bei Anlagen mit sehr tiefem Eigenbedarf (100 kWh/t) entspricht der Stromeigenbedarf ca. 15 % und bei Anlagen mit hohem Eigenbedarf (200 kWh/t) ca. 30 % der erzeugten elektrischen Energie.

Die elektrischen Verbraucher in einer Kehrichtverbrennungsanlage entfallen auf die folgenden Bereiche:

- Abfalltransport- und –zerkleinerung
- Feuerung
- Kessel, Thermische Anlagen
- Rauchgasreinigung
- Abwasserbehandlung
- Nebenanlagen
- Gebäudetechnik

Das Beispiel KVA Linthgebiet zeigt, wie sich die Verbraucher auf die Anlagenbereiche verteilen:

- Rauchgasreinigung	45 %
- Dampferzeuger, Thermische Anlagen	20 %
- Feuerung	11 %
- Abfalltransport- und –zerkleinerung	7 %
- Nebenanlagen	7 %
- Gebäudetechnik	5 %
- Klärschlamm-Mitverbrennung	3 %
- Abwasserbehandlung	2 %

Die Verteilung der Nennleistungen der Verbraucher deckt sich dabei nicht mit der Verteilung der elektrischen Leistungen im Betrieb.

In Anhang 3 ist eine Zusammenstellung der elektrischen Verbraucher, gegliedert nach Anlagenbereich und Nennleistung enthalten.

### 3. Vorgehen bei der Energieoptimierung von Kehrichtverbrennungsanlagen

#### 3.1 Mögliche Vorgehensweisen

Grundsätzlich sind folgende Möglichkeiten für das Vorgehen bei der Energieoptimierung von Kehrichtverbrennungsanlagen möglich:

- a) Vergleich mit Anlagendaten anderer Anlagen

Ein Vergleich von Kennwerten wie spezifischer Stromeigenbedarf und Wirkungsgrad der Verstromung erlaubt eine erste grobe Abschätzung des Optimierungspotentials (vgl. dazu Abbildung 6). Der Vergleich kann auch im Rahmen eines Benchmarking<sup>2</sup> erfolgen. Dabei werden die Anlagen unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit verglichen. Letztlich wird mit der Energieoptimierung in KVA's ebenfalls die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit verfolgt. Beim Benchmarking werden aber neben der Energie weitere Faktoren, die die Wirtschaftlichkeit bzw. konkret die Abfallbehandlungskosten beeinflussen, betrachtet.

- b) Energiebilanz

Die Erstellung einer umfassenden Energiebilanz ist im Rahmen der Energieoptimierung nicht notwendig und auch nicht sinnvoll. Liegt eine solche vor, so soll sie natürlich für die Energieoptimierung genutzt werden. Zur Erstellung einer Energiebilanz ist die Erfassung von Betriebsdaten unumgänglich. Die moderne Leittechnik erleichtert dabei die Datenerfassung stark.

- c) Einsatz von spezifischen Softwarewerkzeugen

Der Einsatz von Software ist in folgenden Bereichen möglich:

- Softwarepakete zur Modellierung, Berechnung und Visualisierung von Stoff- und Energiefüssen (z.B. Umberto<sup>3</sup>);
- Softwarepakete zur Berechnung von Kreislaufprozessen, im speziellen des Wasser-Dampf-Kreislaufs (z.B. KPRO<sup>4</sup>, IPSEpro<sup>5</sup>);
- Software zur Analyse von elektrischen Antrieben (z.B. Motor Master<sup>6</sup> oder OPAL, vgl. dazu Anhang 5).

Der Einsatz von speziellen Softwarepaketen macht im Rahmen einer Grobanalyse wenig Sinn. Der Einsatz von Softwarepaketen für die energetischen Analyse von elektrischen Antrieben ist dagegen aufgrund der relativ einfachen Anwendbarkeit auch bei einer Grobanalyse sinnvoll.

<sup>2</sup> „Benchmarking Schweizer KVA“ ist eine Dienstleistung der Electrowatt-Ekono für Akteure der Thermischen Abfallentsorgung in der Schweiz ([www.ewe.ch](http://www.ewe.ch))

<sup>3</sup> Produkt der ifu Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH, [www.ifu.com](http://www.ifu.com) oder [www.umberto.de](http://www.umberto.de)

<sup>4</sup> Produkt der Fichtner Consulting & IT AG, Dresden, [www.fcit.fichtner.de](http://www.fcit.fichtner.de)

<sup>5</sup> Produkt der Simtech Simulation Technology, Graz, [www.simtechnology.com](http://www.simtechnology.com)

<sup>6</sup> U.S. Department of Energy, Industrial Technologies Program,  
[http://www.oit.doe.gov/bestpractices/software\\_tools.shtml](http://www.oit.doe.gov/bestpractices/software_tools.shtml)

### 3.2 Die Vorgehensstufen der Energieoptimierung

Die „konventionelle“ Vorgehensweise bei der energetischen Optimierung besteht in einem schrittweisen Vorgehen. In einem ersten Schritt wird eine Grobanalyse auf Basis der Liste der wesentlichen Verbraucher erstellt. Diese beinhaltet den Vergleich von Auslegungsdaten mit Betriebsdaten. Wesentliche Abweichungen zwischen gemessener und berechneter Aufnahmeleistung können folgende Ursachen haben und müssen genauer analysiert werden:

- der entsprechende Anlagenbereich arbeitet im Teillastbereich;
- der Antrieb ist für Überlastbetrieb ausgelegt;
- der effektive Betriebspunkt bei Nennlast weicht von den Auslegungsdaten ab;
- die Betriebsdaten hängen von der Reisezeit ab (z.B. der Druckabfall nimmt mit der Reisezeit zu).

Auf Basis der Grobanalyse, wird in einem zweiten Schritt eine energetische Feinanalyse durchgeführt. Die **energetische Feinanalyse** beinhaltet die Erfassung der elektrischen Verbraucher, die detaillierte Auswertung der Daten und die vollständige Zusammenstellung und Prüfung von Massnahmen.

Der vorliegende Bericht enthält in Anhang 1 einen **Massnahmenkatalog mit Checklisten für die einzelnen Anlagenbereiche**. Diese ermöglichen es auf einfache Weise, mögliche Energieoptimierungsmassnahmen zu finden.

Das weitere Vorgehen beinhaltet die Durchführung einer energetischen Analyse, in der die technische Machbarkeit und die Wirtschaftlichkeit der einzelnen, auf Basis der Checkliste ermittelten Massnahmen geprüft und untersucht wird.

In diesem Sinn kann mit Hilfe der Checklisten das Optimierungspotential der Anlage grob abgeschätzt und unnötiger Aufwand für die Datenerfassung vermieden werden.

## 4. Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energie-optimierungsmassnahmen

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Verbesserungsmassnahme existieren verschiedene Methoden. Eine gängige ist die Berechnung des sog. Payback, dass heisst derjenigen Zeit die benötigt wird, um die zur Verbesserung der Energieeffizienz notwendigen Investitionen durch die Kosteneinsparung wieder zurückzubezahlen.

Payback = Amortisationszeit = investiertes Kapital dividiert durch die jährliche Einsparung bei Realisierung der Massnahme.

Die **jährliche Einsparung** berechnet sich dabei aus den Elementen:

- **Jährliche Kapitalkosten**, mit den Faktoren:
  - Investitionsausgaben
  - Zinssatz in % pro Jahr
  - Nutzungsdauer
- **Jährliche Betriebskosten**: Diese beinhalten im wesentlichen Kosten für den Unterhalt. Sie werden in der Regel unter Annahme eines Prozentsatzes der Investitionen pro Jahr berechnet.
- **Jährliche Einsparungen**: Berechnet aus den Energieeinsparungen in kWh pro Jahr multipliziert mit den Vergütungen für den Stromverkauf in Fr./kWh bzw. Bei der Einsparung von fossiler Energie aus den Einsparungen in kg Öl oder m<sup>3</sup> Erdgas multipliziert mit den Kosten für Heizöl oder Erdgas.

Die Massnahmen können dann anhand des Payback wie folgt eingeordnet werden:

- |                                |   |
|--------------------------------|---|
| - Sofortmassnahmen             | Payback < 1 Jahr  |
| - Kurzfristige Massnahmen      | Payback 1-3 Jahre   |
| - Abhängige Massnahmen         | Massnahmen, deren Realisierbarkeit von den Ergebnissen einer vertieften Prüfung abhängt |
| - Unwirtschaftliche Massnahmen | Payback > Nutzungsdauer   |

## 5. Ansatzpunkte zur Reduktion des Energieverbrauchs

Nachfolgend werden mögliche Massnahmen zur Verminderung des Energieverbrauchs in den einzelnen Anlagenbereichen erläutert.

### 5.1 Abfalltransport und -zerkleinerung

Rotorscheren verfügen über elektrische oder elektrohydraulische Antriebe meist mit Leistungen > 200 kW. Sie werden zur Zerkleinerung von grobstückigem Abfall (Sperrgut) eingesetzt. Die Anlagen werden meist nicht ständig sondern nur bei Bedarf eingesetzt. In vielen Anlagen entscheidet der Kranführer, ob der Abfall zerkleinert werden soll oder nicht.

Eine effiziente Nutzung ist dann möglich, wenn der grobstückige Abfall in einem separaten Bereich des Bunkers abgekippt und dann chargeweise bei Einsatz der Rotorschere während mehrerer Stunden zerkleinert wird.

Im Leerlaufbetrieb liegt die Leistungsaufnahme bei Rotorscheren mit elektrohydraulischem Antrieb bei ca. 50-60 % der Nennleistung.

### 5.2 Feuerung

Bei der Feuerung liegt der grösste Energieverbrauch bei der Luftversorgung. Dabei wird zwischen Primär- und Sekundärluft unterschieden. Die Primärluft wird über Schlitze in Roststäben in den auf dem Rost liegenden brennenden Abfall eingeblasen. Der Feuerungsrost ist in Längsrichtung in Zonen und in Querrichtung in Bahnen unterteilt. Jede Zone verfügt über eine eigene Luftzuteilung.

Die Sekundärluft wird in der Nachbrennzone über dem Feuerraum seitlich eingeblasen und dient der Nachverbrennung.

In gewissen Anlagen wird auch Rauchgas rückgeführt und zusammen mit der Sekundärluft eingeblasen (Rauchgasrezirkulation).

In den meisten Feuerungen erfolgt die Zufuhr der Primärluft und der Sekundärluft über je einen gemeinsamen Ventilator. Die Regelung der Luftpunktmengen der einzelnen Luftzuleitungen erfolgt über Venturi-Messstellen oder Druckmessungen über die Blenden mittels Luftklappen.

Die Primärluft dient dabei gleichzeitig der Kühlung der Roststäbe. Der Druckabfall über den Rost beträgt ca. 10 mbar und der Druckabfall über die Abfallschicht liegt bei ca. 3 mbar. Der Anteil der Sekundärluft an der gesamten Verbrennungsluft liegt bei ca. 30-35 %.

Bei **neueren Feuerungen** sind sowohl der Primärluft- als auch der Sekundärluftventilator drehzahlgeregelt. Bei wassergekühlten Rosten erfolgt die Zufuhr der Primär- und der Sekundärluft zu den einzelnen Zonen über getrennte drehzahlgeregelte Ventilatoren. Durch die Wasserkühlung kann die Rostkühlung und die Verbrennungsluftzufuhr getrennt werden. Dies erlaubt eine bessere Regelung und eine Reduktion der Luftmenge und damit auch der Rauchgasmenge. Da die an das Kühlwasser abgeführte Abwärme zur Luftvorwärmung eingesetzt werden kann, geht sie nicht verloren.

Die Auswertung von Betriebsdaten eines konventionellen Verbrennungsluftsystems mit gemeinsamen Ventilatoren für die Primär- und Sekundärluft und eines modernen Systems mit getrennten Ventilatoren für jede Luftzone zeigt, dass die Leistungsaufnahme beim modernen System bei ca. 60 % des konventionellen Systems liegt.

## 5.3 Rauchgasreinigung

### 5.3.1 Saugzüge

Wesentliche Verbraucher sind die Saugzüge. Sie haben die Aufgabe, das Rauchgas durch die einzelnen Stufen der Rauchgasreinigung zu fördern und in der Feuerung einen minimalen Unterdruck zu halten. Saugzüge sind in der gesamten Anlage diejenigen Antriebe mit der grössten Leistung. Ihre Auslegung und Regelung muss daher geprüft werden.

Die Regelung der Leistung erfolgt bei Saugzügen entweder mittels Drallreglern oder Drehzahlregelung.

- Beim Drallregler wird dem Volumenstrom vor Eintritt in das Laufrad durch verstellbare Schaufeln ein Vordrall in Laufrichtung erteilt. Der Regelbereich des Volumenstroms liegt etwa bei 65 – 100 %.
- Bei der Regelung der Leistung mittels Frequenzumrichter liegt der Regelbereich bei ca. 30-100 %.

Der Wirkungsgrad der Drallregelung ist im Teillastbereich, wie die nachstehende Abbildung 7 zeigt, im Vergleich zur Drehzahlregelung deutlich schlechter.

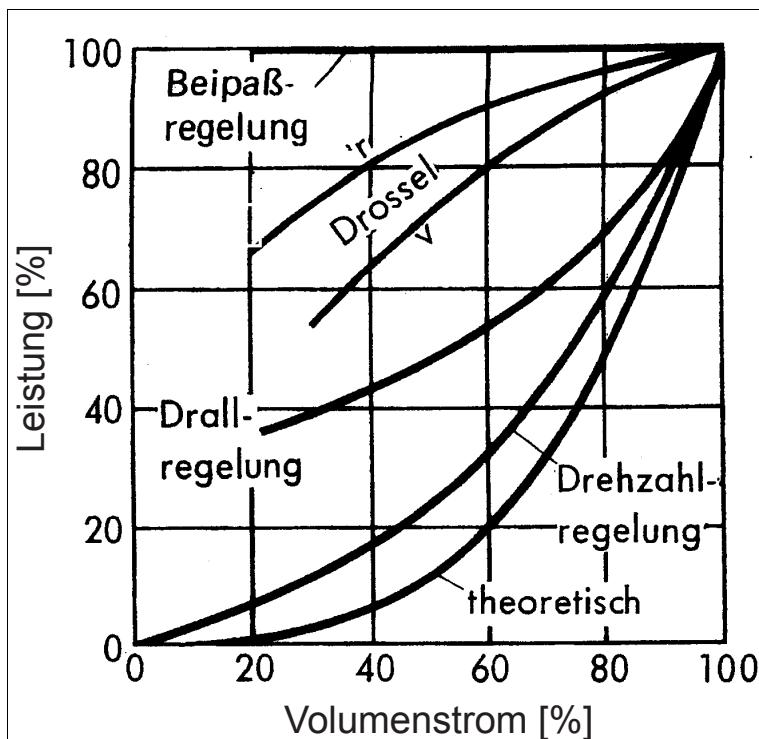


Abbildung 7: Leistungsregelung bei Radial-Ventilatoren mit verschiedenen Methoden

Der Wirkungsgrad von Radialventilatoren liegt im Leistungsbereich von > 100 kW bei ca. 75 %.

### 5.3.2 Rauchgasaufheizung Katalytische Entstickung

Erfolgt die Entstickung der Rauchgase mittels Katalysator, so müssen die Rauchgase bei der sog. Reingasschaltung nach dem Wäscher auf die Betriebstemperatur des Katalysators (250-280 °C) aufgeheizt werden. Da die Rauchgase nach dem Katalysator wieder abgekühlt und die Abwärme wieder mittels eines Gas-Gas-Wärmetauschers an die Rauchgase vor dem Katalysator übertragen wird, muss lediglich ein Teil der Wärme zugeführt werden.

Grundsätzlich bestehen die folgenden Möglichkeiten zur Aufheizung:

#### Variante 1)

- Niederdruckdampf zur Rauchgasvorwärmung (Dagavo)
- Gas-Gas-Wärmetauscher für Wärmeverschiebung zwischen Roh- und Reingas
- Aufheizung auf die Betriebstemperatur des Katalysators mittels Erdgas oder Heizöl befeuertem Brennern

#### Variante 2)

- Wärmetauscher über den Wäscher zur Vorwärmung
- Gas-Gas-Wärmetauscher für Wärmeverschiebung zwischen Roh- und Reingas
- Aufheizung auf die Betriebstemperatur des Katalysators mittels Erdgas oder Heizöl befeuertem Brennern

#### Variante 3)

- Gas-Gas-Wärmetauscher für Wärmeverschiebung zwischen Roh- und Reingas mit säurefester Endstufe
- Aufheizung auf die Betriebstemperatur des Katalysators mittels Erdgas oder Heizöl befeuertem Brennern

Bei allen drei Varianten kann die Aufheizung auf die Endtemperatur anstelle von Heizöl und Erdgas auch mit Hochdruckdampf erfolgen. Dabei stehen den Kosten für den Einsatz von Heizöl oder Erdgas die verminderte Stromproduktion entgegen.

### 5.3.3 Weitere wesentliche Verbraucher Rauchgasreinigung

Neben den Saugzügen sind die folgenden elektrischen Verbraucher von Bedeutung:

- Hochspannungsaggregate der Elektrofilter;
- Pumpen Waschwasser und Quench.

Bei den Elektrofilter besteht keine Möglichkeit der Optimierung.

Bei den Pumpen ist zu prüfen, inwieweit Auslegung und effektiver Betrieb übereinstimmen. Im Vergleich zu den Saugzügen liegen die Leistungen der Pumpenantriebe deutlich tiefer.

Die Wirkungsgrade typischer Kreiselpumpen sind abhängig von der Grösse und liegen beim optimalen Betriebspunkt bei ca. 70-85 %.

## 5.4 Abhitzekessel, Thermische Anlagen

Wesentliche Verbraucher bei den thermischen Anlagen sind:

- Speisewasserpumpen
- Kühlwasserpumpen
- Ventilatoren Luftkondensator

Die Leistung luftgekühlter Kondensatoren ist abhängig von der Wärmeauskopplung und den Umgebungsbedingungen und ist bei reiner Verstromung des im Abhitzekessel erzeugten Dampfes am grössten. Es müssen dann rund 60 % der nutzbaren Energie an die Umgebung abgeführt werden. Unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz, wird bei minimaler Energienutzung (reine Verstromung) die Energiebilanz noch durch den hohen Stromverbrauch der Luftkondensatoren belastet. Dem Stand der Technik entspricht die Drehzahlregelung der einzelnen Ventilatoren des Luftkondensators mittels Frequenzumrichtern.

## 5.5 Abwasserbehandlung

Der Verbrauch ist abhängig vom Verfahrenskonzept. Die elektrischen Verbraucher tragen am Beispiel KVA Linthgebiet aber insgesamt weniger als 2 % zum Gesamtverbrauch bei. Die Verfahrensführung wird daher in erster Linie auf eine kostengünstige Entsorgung der Reststoffe ausgerichtet.

## 5.6 Nebenanlagen

Wesentliche Verbraucher bei den Nebenanlagen sind:

- Drucklufterzeugung
- Pumpen Kühlwasserkreisläufe
- Ventilatoren luftgekühlte Rückkühler Kühlwasserkreisläufe

Die Nebenanlagen tragen am Beispiel KVA Linthgebiet ca. 7 % zum Gesamtverbrauch bei.

Im Sommer, bei in der Regel ohnehin geringerem Gesamtnutzungsgrad der Anlage (keine oder nur geringe Auskopplung von Wärme), ist der Verbrauch aufgrund der hohen Außentemperatur am höchsten.

Informationen zu Energieeinsparungen bei Druckluftanlagen sind in [11] und Anhang 7 enthalten.

## 5.7 Gebäudetechnische Anlagen (Lüftungs-, Kühl- und Klimaanlagen)

Bei den gebäudetechnischen Anlagen fallen bezüglich Energie(Strom)verbrauch vor allem die Lüftungsanlagen ins Gewicht. Sie sorgen dafür, dass die Raumtemperaturen in Technikräumen aufgrund der Abwärme der Anlagenteile nicht auf unzulässig hohe Werte ansteigen. Die Summe der Nennleistungen der gebäudetechnischen Anlagen tragen im Beispiel KVA Linthgebiet ca. 5 % zum Gesamtverbrauch bei. Trotz dieses relativ geringen Anteils, darf das Optimierungspotential in diesem Bereich aber nicht vernachlässigt werden. Da die Situation bezüglich Gebäude von Anlage zu Anlage sehr unterschiedlich ist, sind keine generellen Empfehlungen möglich. Man kann sich beispielsweise die Frage stellen, ob nicht Wärme zur Kälteerzeugung genutzt werden könnte (Absorptionskälteanlage). Die Leistung der Kühlanlagen liegt aber im Beispiel KVA Linthgebiet deut-

---

lich unter 50 kW, so dass die Wirtschaftlichkeit fraglich ist. Die Gebäudeheizung ist nicht relevant, da in KVA's ohnehin immer genügend Wärme zur Verfügung steht.

Mögliche Ansatzpunkte für Energieeinsparungen im Bereich der Be- und Entlüftung sind:

- Luftmengen und Lufttemperatur den Mindestanforderungen anpassen;
- Bedarfssteuerung der Luftmengen;
- Eingebaute Luftfilter überprüfen (Vorfilter vermeiden).

Eine hilfreiche Zusammenstellung der Technik und der Möglichkeiten zur Optimierung betrieblicher Lüftungsanlagen gibt [12].

Zu Vorgehen und Möglichkeiten der **Energieoptimierung bei Pumpensystemen** enthält Anhang 6 Informationen. Weiterhin sei auf Publikationen im Rahmen des europäischen [13,14] sowie des Schweizerischen Motor Challenge Programms [15] verwiesen.

## Literatur

- [1] Statistik der erneuerbaren Energien, Ausgabe 2002, Bundesamt für Energie BFE, Bern
- [2] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2000, Bundesamt für Energie BFE, Bern
- [3] Entwicklung der in KVA zu entsorgenden brennbaren Abfälle und KVA-Verbrennungsakapazität seit 1996, mehrjährige Abfallstatistik BUWAL
- [4] Kugeler, K., Philippen, P.-W.: Energietechnik – Technische, ökonomische und ökologische Grundlagen, Springer-Verlag, Berlin
- [5] DIN 1942, Abnahmeversuche an Dampferzeugern (VDI-Dampferzeugerregeln), 1994
- [6] Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e.V.: Abnahmeversuche an Abfallverbrennungsanlagen mit Rostfeuerungen, FDBR-Richtlinie, Düsseldorf Ausgabe 01/1999,
- [7] VDI Richtlinie Nr. 4608, Blatt 1, Entwurf, Energiesysteme Kraft-Wärme-Kopplung, Begriffe, Definitionen, Beispiele
- [8] Reimann, D.: Ermittlung und Bedeutung von Kennzahlen zur Energie und Anlagennutzung sowie zu Wirkungsgraden für die Abfallverbrennung, Müll und Abfall 10 (2003) 512
- [9] Wandschneider, J.: Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades auf > 30 % - zwei Hochleistungskessel am Beispiel der AVI-Amsterdam, 9. Internationaler Erfahrungsaustausch für Betreiber thermischer Abfallbehandlungsanlagen, 17.-19.10.2004, Bamberg
- [10] Geschäfts- und Jahresberichte Schweizerischer Kehrichtverbrennungsanlagen aus den Jahren 2000-2002.
- [11] Gloor, R.: Energieeinsparungen bei Druckluftanlagen in der Schweiz, Bundesamt für Energie, 2000
- [12] Energieeffiziente Lüftungsanlagen in Betrieben, Landesgewerbeamt Baden-Württemberg. Informationszentrum Energie, Stuttgart 2002
- [13] European Guide to Pump Efficiency for Single Stage Centrifugal Pumps, European Commission, Motor Challenge Programme, May 2003
- [14] Efficiency Characteristics of Centrifugal Pumps, European Commission, Motor Challenge Programme
- [15] Tanner, R.: Die Bestimmung des Energiepotentials bei Pumpen, Semafor Informatik & Energie AG, Basel 2004

## **Massnahmenkatalog Energieoptimierung in Kehrichtverbrennungsanlagen**

Prozess / Anlage	Kriterien / Fragen	A   Abfallanlieferung, -lagerung, -zerkleinerung und -transport	Antwort:					
			Anlieferung	Abfalllagerung (Bunker)	Abfalltransport (Krananlage)	Abfallzerkleinerung	Abfallzwischenlagerung (Ballen)	
Wird der Abfall vorwiegend mit dem LKW angeliefert?	Ist die Anfahrtswege lang?							
Ist die Abfallzusammensetzung konstant?	Ist der Abfall auf dem Transportweg der Witterung ausgesetzt?							
Werden die Bunkeroffnungen ausschließlich vor?	Entspricht der aktuelle Heizwert des Abfalls dem Auslegungshiezwert?							
Werden die Bremssenergie des Kranes rekupiert?	Kann die Kranantriebe mit Frequenzumrichtern ausgerüstet?							
Wird die Bremsenergie des Kranes rekupiert?	Sind die Kranantriebe mit Frequenzumrichtern ausgerüstet?							
Kann der Kran gleichzeitig heben und fahren?	Ist der Kran mit elektrischen Bremswiderrständen ausgestattet?							
Wird der Kran vorwiegend manuell bedient?	Wird der Kran mit elektrischen Bremswiderrständen ausgestattet?							
Sind für die Verteilung des Mülls ständig Kranarbeiten nötig?	Wird der Kran mit elektrischen Bremswiderrständen ausgestattet?							
Werden die Bunkeröffnungen ausschließlich vor?	Werden die Bremssenergie des Kranes rekupiert?							
Werden die Bremssenergie des Kranes rekupiert?	Kann der Kran gleichzeitig heben und fahren?							
Wird der Kran vorwiegend manuell bedient?	Wird die Bremsenergie des Kranes rekupiert?							
Sind die Kranantriebe mit Frequenzumrichtern ausgerüstet?	Sind die Kranantriebe mit Frequenzumrichtern ausgerüstet?							
Wird das Spergut vorsortiert?	Besteht die KVA eine Abfallzerkleinerung?							
Ist die Zerkleinerung überdimensioniert?	Ist die Zerkleinerung überdimensioniert?							
Wird das Spergut vorsortiert?	Besteht die Möglichkeit, Schwankungen in der angeliferten Abfallmenge durch Zwischenlagerung auszugleichen?							
Ist die Zerkleinerung überdimensioniert?	Kann der erhöhte Fermwarmbedarf in den Wintermonaten durch Stapelung des Abfalls genutzt werden?							
Wird das Spergut vorsortiert?	Muss bei Anlagenstillstanden der Abfall in anderen Anlagen entsorgt werden?							

Prozess / Anlage	Kriterien / Fragen	Antwort:	B   Feuerung							
			Primärluft	Sekundärluft	Rauchgasrückführung	Rostkühlung	Stützbrenner	Entschlacker und Schlaakeaustrag	Mitverbrennung von Klärschlamm	betriebliche Optimierung
	Kann die Zuluft ohne nennenswerte Druckverluste ange sogen werden?		18; 19; 24	24; 25	23	12; 14; 20	9; 12	9	9	22
	Sind die Lüftungsschüsse hinreichend gross dimensioniert?		18; 19; 24	24; 25	23	12; 14; 20	9; 12	9	9	22
	Sind Klappe n, Filter oder Drosseln in der Luftzuführung eingebaut?		18; 19; 24	24; 25	23	12; 14; 20	9; 12	9	9	22
	Legt die installierte Nennleistung wesentlich über der gemessenen Leistung?		18; 19; 24	24; 25	23	12; 14; 20	9; 12	9	9	22
	Werden die Luftvolumenströme über Klappen geregelt?		18; 19; 24	24; 25	23	12; 14; 20	9; 12	9	9	22
	Sind Drailegler zur Regelung der Gebläseförderleistung installiert?		18; 19; 24	24; 25	23	12; 14; 20	9; 12	9	9	22
	Sind bei allen Antiebenen Frequenzumformer installiert?		18; 19; 24	24; 25	23	12; 14; 20	9; 12	9	9	22
	Ist der Druck der Primärluftzuführ unter dem Rost geregelt?		18; 19; 24	24; 25	23	12; 14; 20	9; 12	9	9	22
	Arbeiten die Gebläse mit optimalem Wirkungsgrad?		18; 19; 24	24; 25	23	12; 14; 20	9; 12	9	9	22
	Arbeiten die Antiebe der Gebläse mit optimalem Wirkungsgrad?		18; 19; 24	24; 25	23	12; 14; 20	9; 12	9	9	22
	Ist der Feuerungsröst wassergerückt?		18; 19; 24	24; 25	23	12; 14; 20	9; 12	9	9	22
	Schwankt der TS-Gehalt des Klärschlams stark?		18; 19; 24	24; 25	23	12; 14; 20	9; 12	9	9	22
	Wird die verminderete Stromproduktion aufgrund der % vergütet?		18; 19; 24	24; 25	23	12; 14; 20	9; 12	9	9	22
	Wird die verminderete Stromproduktion aufgrund der % vergütet?		18; 19; 24	24; 25	23	12; 14; 20	9; 12	9	9	22
	Werden die erhöhten Unreinigkeiten aus der Mitverbrennung von Klärschlamm zu 100 % vergütet?		18; 19; 24	24; 25	23	12; 14; 20	9; 12	9	9	22

Prozess / Anlage	Kriterien / Fragen	Antwort:		C   Rauchgasreinigung	D   Reststofftransport- und lagerung	E   Abwasserbehandlung / Reststoffbehandlung
		Installiert	Nicht installiert			
Sind bei den grosseren Pumpen Frequenzumrichter	Ist der Sollwert für den Druckabfall über den Rauchgaswaschern optimal?	21	19; 21; 22; 26	Rauchgaswäsche		
Entstellt die Verschmutzung des Katalysators bzw.	Erfolgt die Rauchgasauflaufheizung bei der katalytischen Entstickung mittels Primärenergie?			Entstickung		
Entspricht die Ansteige des Druckabfalls den Auslegungsdaten?	Kann die Reaktionstemperatur gesenkt werden?					
Ist für die Saugzugregelung ein Drallregler installiert?	Arbeitet das Saugzugebläse mit optimalem Wirkungsgrad?					
Entspricht die Saugzugregelung ein Drallregler installiert?	Werden in der Abwasser- und Reststoffbehandlung verwertbare Produkte hergestellt?					
Entspricht die Entwässerung des Abwasserschlammes dem Stand der Technik? (Membranfilterprozesse)	Werden in der Abwasser- und Reststoffbehandlung verwertbare Produkte hergestellt?					

Prozess / Anlage	Kriterien / Fragen	F   Energieerzeugung	Antwort:								
				Abhitzekessel	Wasser-Dampf-Kreislauf	Dampfturbine	Generator	Dampfkondensation	Dampfauskopplung für Fernwärmemenuutzung	Speisewassererzeugung / VE-Anlage	Fossil befeuerte Hilfs- und Stützkessel
	Liegt der Kessellwirkungsgrad über 84 %?										
	Entspricht die Dampfproduktion am Ende der Reisezeit den Kessels des dem Auslegungsdaten des Lieferanten?										
	Liegt der Wirkungsgrad der Stromerzeugung bei reinen Verstromung bei über 20 %										
	Wird der Anlagenendurcharrest bzw. die Stromerzeugung durch hohe Umgebungstemperatur begrenzt?										
	Sind die Ventilatoren des LUKO mit Frequenzumrichtern ausgerüstet?										
	Kann bei tiefer Umgabebedeutung gesenkt werden?										
	Sind bei den Speisewasserpumpen Turbopumpen eingesetzt?										
	Ist eine Absenkung der Rücklauftemperatur möglich?										
	Wird Abwärme aus der Rauchgas kondensation zur Aufheizung des FW Rucklaufs genutzt?										
	Ist der Einsatz eines Heisswasser speichers zur Erhöhung der Spitzenlastabgabe geprüft worden?										
	Liegt die innenlietere Neunielastung der grosseren Pumpen wesenlich über der gemessenen Leistung?										
	Sind bei den Pumpen Frequenzumrichter installiert?										
	Weisen Pumpen grosse Förderstrom- und/oder Druckschwankungen auf?										
	Arbeiten die grosseren Pumpen mit optimalem Wirkungsgrad?										
	Wird die Kühlleistung temperaturgeregt?										
	Entspricht die Dämmung dem Stand der Technik?										

Prozess / Anlage	Kriterien / Fragen	G   EMSR-Technik	
		Antwort:	
	Wird die Leistungsaufnahme aller Anteile mit Nennleistung > 10 kW kontinuierlich erfasst?		
	Wird die Leistungsaufnahme aller Anteile mit Nennleistung > 50 kW kontinuierlich erfasst?		
	Wird die Leistungsaufnahme aller Anteile mit Nennleistung > 10 kW kontinuierlich erfasst?		
	Kann die Anzeige der Leistungsaufnahme Zusätzlicher Anteile in der Visualisierung programpaliert werden?		
	Existiert ein Lastmanagement zur Maximierung der Spitzenlastabgabeb?		
	Existiert ein Lastmanagement für das Anfahren der Anlage?		
	Wird die Messung der Leistungsaufnahme von Anteilen zur die Planung von Wartungsarbeiten genutzt?		
	Ermittelt die Leitechnik die Auswertung von Betriebsdaten?		
	Entspricht die Feuerleistungssregelung dem Stand der Technik?		
	Ist der Wirkungsgrad der Trafostationen bekannt?		



Prozess / Anlage	Kriterien / Fragen	I   Gebäudetechnische Anlagen		K   Gebäude
		Antwort:		
	Ist die Nutzung von Abwärme zur Gebäudedehitzung möglich?			
	Ist die Raumheizung den Mindestanforderungen angepasst?			
	Sind die Luftmenngen und -temperatur den Mindestanforderungen angepasst?			
	Erfüllt die Lüftung / -kühlung temperaturgesteuer?			
	Werden die Nutzungsszeiten beim Betrieb der Lüftungs-/Kühlanlagen berücksichtigt?			
	Sind die Temperatursollwerte bedarfsgerecht eingestellt?			
	Erfüllt die Lüftung / -kühlung temperaturgesteuer?			
	Werden die Nutzungsszeiten beim Betrieb der Lüftungs-/Kühlanlagen berücksichtigt?			
	Sind Luftklappen installiert?			
	Sind die Lüftungsdurchsätze genügend gross dimensioniert?			
	Liegt die innenleistung wesentlich über der gemessenen Leistung?			
	Sind zur Leistungsaufteilung der Ventilatoren Frequenzumrichter eingesetzt?			
	Entspricht die Warmdämmung dem Stand der Technik?			
	Sind energiesparende Leuchten installiert?			
	Wird die Beleuchtung bedarfsgesteuert?			
	Entspricht die Dämzung dem Stand der Technik?			
	Sind die Mitarbeiter sensibilisiert oder geschult, Strom, Wärme und Wasser sparsam einzusetzen?			



## Anhang 2 Definitionen Abkürzungen, Kennwerte und Wirkungsgrade

### 1. Abkürzungen, Begriffe und Zahlenwerte

#### 1.1 Lateinische Buchstaben

c	Spezifische Wärmekapazität	kJ/kg K
h	Spezifische Enthalpie	kJ/kg
H <sub>u</sub>	Heizwert	kJ/kg
I	Elektrische Stromstärke	A
<i>m</i>	Massenstrom	kg/s
P	Leistung	kW
p	Druck	Pa
<i>Q</i>	Wärmestrom	KW
t	Temperatur	°C
U	Elektrische Spannung	V

#### 1.2 Griechische Buchstaben

α	Wärmeausbeute	-
β	Stromausbeute	-
ω	Brennstoffausnutzungsgrad	-
̄ω	Mittlerer Brennstoffausnutzungsgrad	-
ν	Stromverlustkennzahl	-
η	Wirkungsgrad	-
η	Nutzungsgrad	-
ρ	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
φ	Phasenverschiebungswinkel	-
Δ	Differenz	-

#### 1.3 Indizes

A	Asche
Ab	Abschlämmung
b	Bezugsgrösse
B	Brennstoff
Brü	Brüden
C	Kohlenstoff
CO	Kohlenmonoxid
D	Dampf
D'	Entnahmedampf
eff	effektiv

---

Fortsetzung 1.3 Indizes:

el	elektrisch
FA	Flugasche
FL	Prozessluft
G	Feuchtes Rauchgas
ges	Gesamt
GT	Trockenes Rauchgas
H <sub>2</sub> O	Wasser(dampf)
i	Anzahl (Ort, Art)
K	Kessel
Kond	Kondensat
Kü	Kühlung
L	Luft
LT	Trockene Luft
LV	Luftvorwärmung
m	mechanische (Leistung)
max	maximal
N	Nenn- oder Nutz-
n	Normzustand
PL	Primärluft
RA	Rostasche
SL	Sekundärluft
Sp	Speisewasser
St	Strahlung
th	Thermisch
V	Verlust(wärme)
w	Wirk-
Z	Zugeführt(e Energie)

## 1.4 Zahlenwerte

t <sub>b</sub>	Bezugstemperatur	25	°C
T <sub>n</sub>	Normtemperatur	273.15	K
p <sub>n</sub>	Normdruck	1013.25	Pa

## 2. Definitionen Kennwerte

### 2.1 Energiebilanz

Die Energiebilanz des Dampferzeugers lautet in ihrer allgemeinen Form:

$$\dot{Q}_{Zges} = \dot{Q}_N + \dot{Q}_{Vges} \quad (2-1)$$

mit:  $\dot{Q}_{Zges}$  gesamter zugeführter Energiestrom  
 $\dot{Q}_N$  Nutzwärmeleistung  
 $\dot{Q}_{Vges}$  gesamter abgeführter Energiestrom (Verlust)

Weiterhin gilt für den gesamten zugeführten Energiestrom:

$$\dot{Q}_{Zges} = \dot{Q}_{ZB} + \dot{Q}_Z \quad (2-2)$$

wobei  $\dot{Q}_Z$  sonstige zugeführte Energieströme umfasst.

Hierin ist:

$$\dot{Q}_{ZB} = \dot{m}_B \cdot [H_{uB} + \bar{c}_B (t_B - t_b)] \quad (2-3)$$

mit:  $\dot{Q}_{ZB}$  zugeführter Brennstoffwärmestrom  
 $\dot{m}_B$  Brennstoffmassenstrom  
 $H_{uB}$  Heizwert Brennstoff  
 $\bar{c}_B$  Mittlere spezifische Wärmekapazität des Brennstoffs im betrachteten Temperaturbereich  
 $t_B$  Temperatur des Brennstoffs  
 $t_b$  Bezugstemperatur

Bei Vernachlässigung der fühlbaren Brennstoffwärme kann die unbekannte eingebrachte Brennstoffwärme aus den Gleichungen (2-1) und (2-3) bestimmt werden:

$$\dot{m}_B \cdot H_{uB} = \dot{Q}_N + \dot{Q}_{Vges} - \dot{Q}_Z \quad (2-4)$$

### 2.2 Kesselwirkungsgrad

Der Kesselwirkungsgrad  $\eta_K$  ist definiert als:

$$\eta_K = \frac{\dot{Q}_N}{\dot{Q}_{Zges}} = \frac{\dot{Q}_N}{\dot{Q}_N + \dot{Q}_{Vges}} \quad (2-5)$$

Die sonstigen zugeführten Energieströme ergeben sich im wesentlichen aus der fühlbaren Wärme der Verbrennungsluft, der Wellenleistung der relevanten Antriebe und dem Wärmestrom der Brüden.

$$\dot{Q}_Z = \dot{Q}_{PL} + \dot{Q}_{SL} + \dot{Q}_{FL} + \dot{Q}_{LV} + \dot{Q}_{Brü} + P_m \quad (2-6)$$

- mit:  $\dot{Q}_{PL}$  Wärmestrom Primär Luft hinter Gebläse  
 $\dot{Q}_{SL}$  Wärmestrom der Sekundär Luft hinter Gebläse  
 $\dot{Q}_{FL}$  Wärmestrom der Prozessluft  
 $\dot{Q}_{LV}$  Wärmestrom zur Beheizung der Luft (Luftvorwärmung)  
 $\dot{Q}_{Brü}$  Wärmestrom der Brüden  
 $P_m$  Wellenleistung relevanter Antriebe

Die Nutzwärme ist der gesamte Energiestrom, der im Dampferzeuger an das Wasser bzw. den Dampf übertragen wird. Eine Entnahme von Heizdampf (z.B. Satt dampf aus der Trommel) ist zusätzlich zu berücksichtigen, wenn dessen Verbraucher außerhalb der Systemgrenze liegt.

$$\dot{Q}_N = \dot{m}_D \cdot (h_D - h_{Sp}) + \dot{m}_D \cdot (h_{D'} - h_{Sp}) + \dot{m}_{Ab} \cdot (h_{Ab} - h_{Sp}) \quad (2-7)$$

- mit:  $\dot{m}_D$  Heissdampfmassenstrom  
 $\dot{m}_{Ab}$  Massenstrom der Kesselabschlämmung  
 $h_D$  Enthalpie des Heissdampfes  
 $h_{D'}$  Enthalpie des Entnahmedampfes  
 $h_{Ab}$  Enthalpie des Abschlämmwassers  
 $h_{Sp}$  Enthalpie des Speisewassers

Die Verluste setzen sich aus den folgenden Anteilen zusammen:

$$\dot{Q}_{Vges} = \dot{Q}_G + \dot{Q}_{CO} + \dot{Q}_{RA} + \dot{Q}_{FA} + \dot{Q}_{St} + \dot{Q}_{Kü} \quad (2-8)$$

- mit:  $\dot{Q}_G$  Rauchgasverlust hinter Dampferzeuger  
 $\dot{Q}_{CO}$  Verlust durch unvollkommene Verbrennung  
 $\dot{Q}_{RA}$  Verlust durch Wärmeinhalt und Unverbranntes in der Rostasche  
 $\dot{Q}_{FA}$  Verlust durch Wärmeinhalt und Unverbranntes in der Flugasche  
 $\dot{Q}_{St}$  Verlust durch Strahlung, Leitung und Konvektion  
 $\dot{Q}_{Kü}$  Verlust durch Kühlung von Anlagenteilen

Die Kühlung von Anlagenteilen kann z.B. den wassergekühlten Rost umfassen.

Der wichtigste Beitrag zu den Wärmeverlusten sind die Verluste über das Rauchgas

$$\dot{Q}_G = \dot{m}_G \cdot \bar{c}_{pG} \cdot (t_G - t_b) \quad (2-8.1)$$

- mit:  $\dot{m}_G$  Massenstrom des feuchten Rauchgases aus der Verbrennung, staubfrei  
 $\bar{c}_{pG}$  mittlere spezifische Wärmekapazität des Rauchgases im betrachteten Temperaturbereich  
 $t_G$  Rauchgastemperatur am Dampferzeugeraustritt  
 $t_b$  Bezugstemperatur ( $25^{\circ}\text{C}$ )

Aus den Gleichungen 2-4, 2-7 und 2-8.1 kann vereinfacht der Heizwert berechnet werden.

Ausführliche Angaben zur Bestimmung des Kesselwirkungsgrades sind in der DIN 1942 (Abnahmeversuche an Dampferzeugern) [6] enthalten. Weitere Angaben und Beispielrechnungen sind

in der FDBR Richtlinie Abnahmeversuche an Abfallverbrennungsanlagen mit Rostfeuerungen aufgeführt [7].

## 2.3 Beispielrechnung Bestimmung Heizwert und Kesselwirkungsgrad

### 2.3.1 Heizwertbestimmung

*Brennstoff:*

Abfallmassenstrom	$\dot{m}_B$	10.00 t/h
-------------------	-------------	-----------

*Nutzwärmeleistung:*

Frischdampfmassenstrom	$\dot{m}_D$	38.10 t/h
------------------------	-------------	-----------

Frischdamptemperatur	$t_D$	400 °C
----------------------	-------	--------

Frischdampfdruck	$p_D$	40 bar
------------------	-------	--------

Frischdampfenthalpie	$h_D$	3214.373 kJ/kg
----------------------	-------	----------------

Speisewassertemperatur	$t_{Sp}$	135 °C
------------------------	----------	--------

Speisewasserdruck	$p_{Sp}$	51 bar
-------------------	----------	--------

Speisewasserenthalpie	$h_{Sp}$	570.947 kJ/kg
-----------------------	----------	---------------

*Rauchgas:*

Rauchgasvolumenstrom	$\dot{V}_G$	74'912 Nm <sup>3</sup> /h
----------------------	-------------	---------------------------

Rauchgastemperatur nach Kessel	$t_G$	220 °C
--------------------------------	-------	--------

Rauchgasdichte	$\rho_G$	1.2908 kg/m <sup>3</sup>
----------------	----------	--------------------------

Mittlere Spez. Wärmekapazität Rauchgas	$\bar{c}_{pG}$	1.0692 kJ/kg K
--	----------------	----------------

im Temperaturbereich  $t_b$  bis  $t_G$

<b>Berechneter Heizwert</b>	$H_u$	<b>12'088 kJ/kg</b>
-----------------------------	-------	---------------------

### 2.3.2 Berechnung des Kesselwirkungsgrades

Aus den Daten unter 2.3.1 ergibt sich ein Kesselwirkungsgrad von 84.23 %.

Da bei dieser Berechnungsvariante verschiedene Verluste vernachlässigt wurden, liegt der tatsächliche Kesselwirkungsgrad tiefer.

## 2.4 Wirkungsgrade

### 2.4.1 Einleitung

Unter Wirkungsgraden versteht man das Verhältnis aus nutzbaren abgegebenen Energieströmen (sog. Zielenergieströme) und in einem Prozess oder in einer Anlage aufgewandten Energieströmen im stationären oder quasistationären Zustand.

Man unterscheidet die energetischen Wirkungsgrade anhand der Zielenergieströme, wie z.B. den elektrischen Wirkungsgrad, den thermischen Wirkungsgrad usw.

Häufig wird für den energetischen Wirkungsgrad die verkürzte Bezeichnung Wirkungsgrad gebraucht.

### 2.4.2 Thermischer Wirkungsgrad des Dampfturbinenprozesses

Im Fall der Kondensationsturbine besteht der Dampfturbinenprozess aus den Komponenten Dampfkessel, Turbine, Kondensator und Kesselspeisepumpe. In der nachfolgenden Abbildung ist der Prozess im h-s-Diagramm dargestellt.

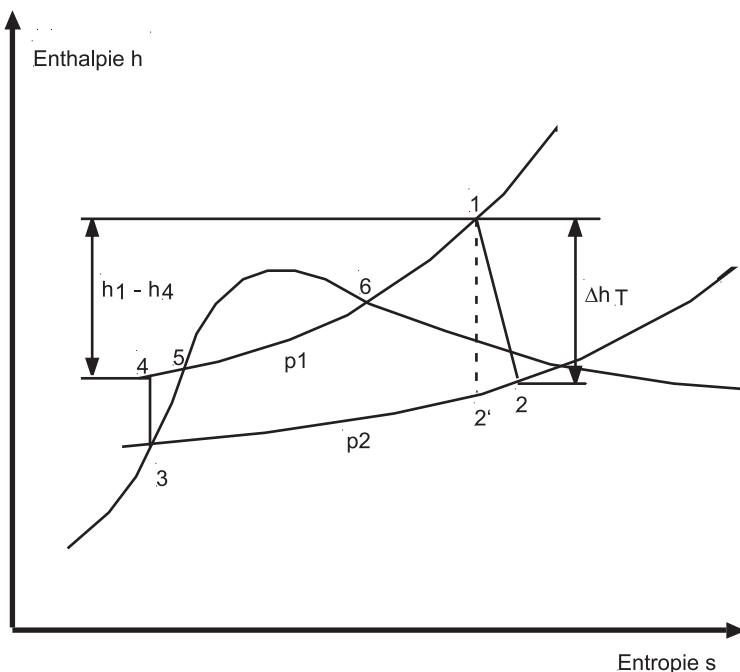


Abbildung A2-1: Einfacher Dampfturbinenprozess im h-s-Diagramm

Idealisiert betrachtet beinhaltet der Kreisprozess eine isobare Wärmezufuhr im Kessel (4 – 1), eine isentrope Expansion in der Turbine (1 – 2), eine isobare Kondensation des Turbinenabdumpfes (2 – 3) und eine isentrope Druckerhöhung in der Kesselspeisepumpe 3 – 4).

Der Dampfturbinenkreislauf kann für den stationären Fall mit folgenden Gleichungen beschrieben werden.

$$\text{Turbinenleistung: } P_T = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) \quad (2-9.1)$$

$$\text{Kesselleistung: } \dot{Q}_K = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad (2-9.2)$$

$$\text{Kondensationsleistung: } \dot{Q}_{Kond} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) \quad (2-9.3)$$

$$\text{Pumpleistung Speisewasserpumpe: } P_p = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3) \quad (2-9.4)$$

Die Expansion in der Turbine ist nicht isentrop (Verlauf 1 - 2'), sondern verläuft entlang der Linie 1 – 2. Es wird ein sog. innerer Wirkungsgrad definiert:

$$\eta_i = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2'}} \quad (2-10)$$

Für den thermischen Wirkungsgrad des einfachen Kreisprozesses ergibt sich dann:

$$\eta_{th} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} \quad (2-11)$$

Der thermische Wirkungsgrad hängt somit im wesentlichen vom Frischdampfzustand (Pkt. 1), den Kondensationsbedingungen (Pkt. 2) und dem inneren Wirkungsgrad der Turbine ab.

Die tatsächlich erzeugte elektrische Energie ist aufgrund zahlreicher Verluste erheblicher geringer als der thermische Wirkungsgrad.

Für den Gesamtwirkungsgrad der Stromerzeugung (auch als sog. Stromausbeute  $\beta$  bezeichnet) ergibt sich:

$$\beta = \frac{P}{\dot{m}_B H_u} = \eta_{ges} = \eta_{th} \cdot \eta_{Kessel} \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_{Gen} \quad (2-12)$$

#### 2.4.3 Brennstoffausnutzungsgrad

Bei gekoppelter Produktion zweier Zielergien mit unterschiedlichen Energiequalitätsgraden, z.B. Strom und Wärme bei der Kraft-Wärme-Kopplung, wird der energetische Gesamtwirkungsgrad auch als **Brennstoffausnutzungsgrad**  $\omega$  bezeichnet.

$$\omega = \frac{\dot{Q} + P}{\dot{m}_B H_u} = \alpha + \beta \quad (2-13)$$

mit der **Wärmeausbeute**  $\alpha$

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_B H_u} \quad (2-14)$$

und **Stromausbeute**  $\beta$ , die im praktischen Sprachgebrauch auch als elektrischer Wirkungsgrad der Kraft-Wärme-Kopplung bezeichnet wird

$$\beta = \frac{P}{\dot{m}_B H_u} \quad (2-15)$$

#### 2.4.4 Mittlere Wirkungsgrade über Zeiträume

Mittlere Wirkungsgrade über Zeiträume sind Verhältnisse von Zielenergien zu den aufgewandten Energien über einen bestimmten Betrachtungszeitraum, häufig ein Jahr. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden diese mittleren Wirkungsgrade über ein Jahr auch als **Nutzungsgrade** bezeichnet. So kann der **mittlere Brennstoffausnutzungsgrad**  $\bar{\omega}$  definiert werden. Im betrachteten Zeitraum sind alle Pausen-, Stillstands-, Leerlauf-, Anfahr- und Abfahrzeiten eingeschlossen.

$$\bar{\omega} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} + \int_{t_1}^{t_2} P}{\int_{t_1}^{t_2} m_B H_u} \quad (2-16)$$

wobei  $t_2 - t_1 = 1$  Jahr darstellt.

Im nachfolgenden Diagramm sind der Brennstoffausnutzungsgrad  $\omega$  und die Stromausbeute  $\beta$  in Abhängigkeit vom Verhältnis der produzierten elektrischen Leistung  $P$  zum produzierten Wärmestrom  $\dot{Q}$  dargestellt. Die Differenz zwischen Brennstoffausnutzungsgrad und Stromausbeute ist die Wärmeausbeute  $\alpha$ .

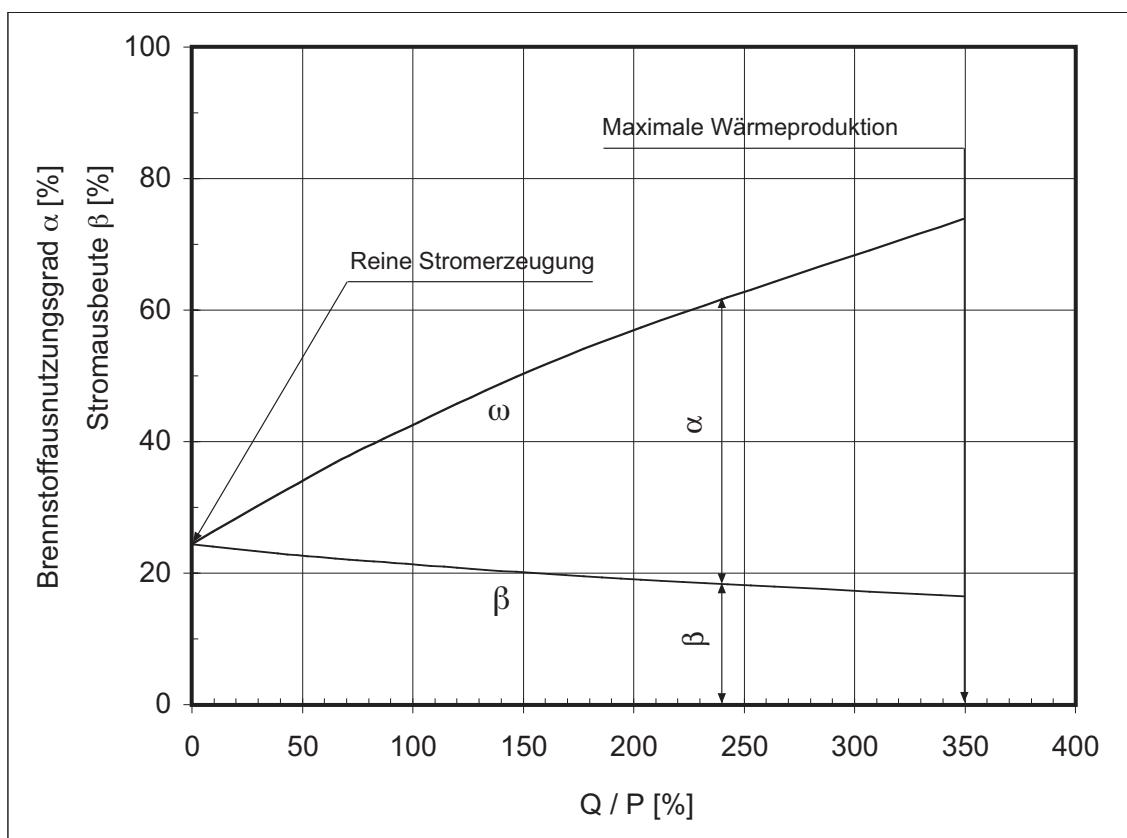


Abbildung A2-2: Brennstoffausnutzungsgrad und Stromausbeute in Funktion des Verhältnisses Wärmestrom zur elektrischen Leistung Q/P

## 2.5 Stromverlustkennzahl $\vartheta$ bei der Kraft-Wärme-Kopplung

Die Stromverlustkennzahl  $\vartheta$  ist eine anlagenspezifische Kennzahl, die auch Stromeinbusse genannt wird. Sie findet hauptsächlich bei der Beurteilung von Anzapf- und Entnahmekondensationsturbinen Anwendung. Sie ist definiert als

$$\vartheta = \frac{\Delta P}{\dot{Q}} \quad (2-17)$$

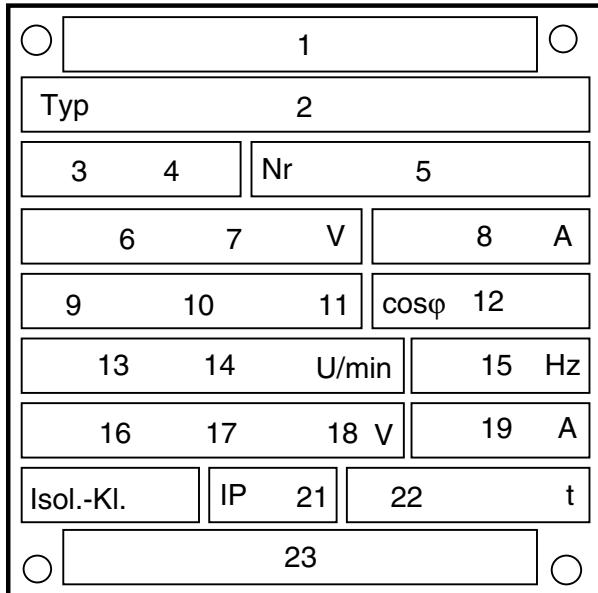
wobei  $\Delta P$  die gemessene elektrische Leistungseinbusse durch Auskopplung des Wärmestroms  $\dot{Q}$  bei gleichen Frischdampfparametern und gleichem Umgebungszustand bedeutet. Sie hätte bei vollständiger Entspannung des Entnahmedampfes bzw. des Anzapfdampfes in der entsprechenden Kondensationsturbine vermieden werden können.

## Anhang 3 Übersicht elektrische Verbraucher in Kehrichtverbrennungsanlagen – geordnet nach Nennleitung und Anlagenbereich

Anlagenbereich	< 10 kW	10 - 50 kW	50 - 100 kW	100 - 500 kW	> 500 kW
<b>Abfalllagerung, Abfalltransport, Abfallstapelung</b>	Kranantrieb für horizontale Bewegung	Kran, Antriebe für Hubbewegung und Schliesswerk	Ballenpressen	Rotorscheren, Sperrmüllscheren	
	Plattenbänder für Eintrag Sperrmüll				
	Rückkühlner Ölkreisläufe Hydraulik				
	Pumpen hydraul. Antriebe Kran / Sperrmüllschere				
<b>Feuerung</b>	Ventilatoren Primärluft bei Einzelversorgung der Rostzonen	Antrieb Hydraulik Feuerungsrost	Ventilator Sekundärluft (abhängig von der Durchsatzleistung und vom System)	Ventilator Primärluft (abhängig von der Durchsatzleistung und vom System)	
	Förderbänder Entschlacker	Rückkühlner Kühlwasser-kreislauf bei wassergekühlten Feuerungsrosten			
<b>Dampferzeuger, Thermische Anlagen</b>	Pumpen Schmierölkreisläufe Turbogruppen, Nebenkondensat-pumpen	Kondensat-pumpen, Ventilatoren Luftkondensator, Ventilator Förderluft Kugelregen Kessereinigung	Kühlwasser-pumpen Turbogruppen	Speisewasser-pumpen (in der Regel nur für den Anfahrvorgang, im Betrieb mit Dampf betrieben)	
	Begleitheizungen	Fernwärmepumpen			
	Antriebe Armaturen	Speisewasser-pumpen Hilfskessel			
<b>Rauchgasreinigung</b>	Pumpen Heizungen	Pumpen Quench und Waschwasser-kreisläufe	Hochspannungs-aggregate Elektrofilter		Saugzüge (abhängig von der Durchsatzleistung der Anlagenlinien)
	Förderreinrichtungen (Förderbänder, Förderschnecken, Schwingrinnen, Trogkettenförderer)	Heizungen für Elektrofilter und Katalysator (Stillstand) und Förder-einrichtungen			
	Ventilatoren (Entstaubung Silos)				
<b>Abwasserbehandlung</b>	Pumpen				
	Hydraulik				
	Filterpresse				
	Rührwerke				
<b>Nebenanlagen</b>	Förderbänder				
	Hydraulikantrieb Bunkertore	Ventilatoren Rückkühlwerke	Druckluft-kompressoren		
	Krananlagen Werkstätten, Turbinenhalle	Pumpen Brauchwasser, Kühlwasser und Rückkühlner			
<b>Klärschlamm-Mitverbrennung (entwässerter Klärschlamm)</b>	Antriebe Aufstreuverrichtungen Klärschlamm in den Aufgabetrichter	Hydraulikantrieb Dickstoffpumpen			
<b>Gebäudetechnik</b>	Ventilatoren Lüftungsanlagen	Ventilatoren Lüftungsanlagen			
	Pumpen Heizungsanlagen				
	Ventilatoren Rückkühlwerke				

## Anhang 4 Nennleistungsdaten Elektromotoren

Die **Nenndaten einer elektrischen Maschine** sind auf dem Leistungsschild nach der nachfolgenden Abbildung angegeben.



Leistungsschild nach DIN 42961

Erklärungen zum Leistungsschild nach DIN 42961

Feld	Erklärung	Feld	Erklärung
1	Hersteller oder Firmenzeichen	13	Drehrichtung, auf Antriebseite gesehen
2	Typ oder Bezeichnung	14	Nenndrehzahl
3	Stromart: Gleichstrom -, Wechselstrom 3~	15	Nennfrequenz
4	Arbeitsweise, z.B. Mot., Gen.	16	Err.: Erregung bei Gleichstrom., Lfr. Läufer bei ASM
5	Fertigungsnummer	17	Schaltart der Läuferwicklung
6	Schaltart Stern / Dreieck	18	Nennerregerspannung
7	Nennspannung	19	Nennerregerstrom
8	Nennstrom	20	Isolierstoffklasse
9, 10	Nennleistung und Einheit	21	Schutzart
11	Betriebsart	22	Gewicht
12	Leistungsfaktor	23	Zusätzliche Vermerke

Aus den Angaben des Leistungsschildes erhält man die folgenden Daten:

$$\text{Aufnahmeleistung } P_1 = \sqrt{3} U_N I_N \cos\varphi$$

mit:  $U_N$  Nennspannung  
 $I_N$  Nennstrom  
 $\cos\varphi$  Leistungsfaktor

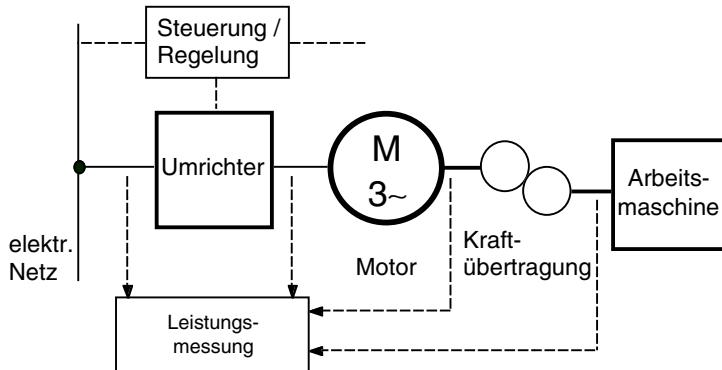
Abgabe- oder Nennleistung:  $P_2$

Wirkungsgrad:  $\eta = P_2 / P_1$

## Anhang 5 Einsatz von Softwarewerkzeugen zur energetischen Optimierung

Die wichtigsten elektrischen Verbraucher in Kehrichtverbrennungsanlagen sind Pumpen und Ventilatoren.

Softwarepakete zur energetischen Optimierung können nur sinnvoll eingesetzt werden, wenn Sie die Komponenten des gesamten Antriebssystems, wie nachfolgend dargestellt, einbeziehen.



Schema Antriebssystem

Im Rahmen des sog. Motor-Challenge-Programm<sup>7</sup> Schweiz wurde unter anderem mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie von der Firma Semafor AG<sup>8</sup> das Softwarewerkzeug OPAL entwickelt. Die Version 3 von OPAL ermöglicht die einfache und schnelle Bestimmung der Energieeffizienz von Pumpen- und Ventilatorantrieben. Das Programm kann kostenlos genutzt werden.

Der Ablauf des Optimierungsvorgangs mittels OPAL ist schematisch auf der nächsten Seite dargestellt.

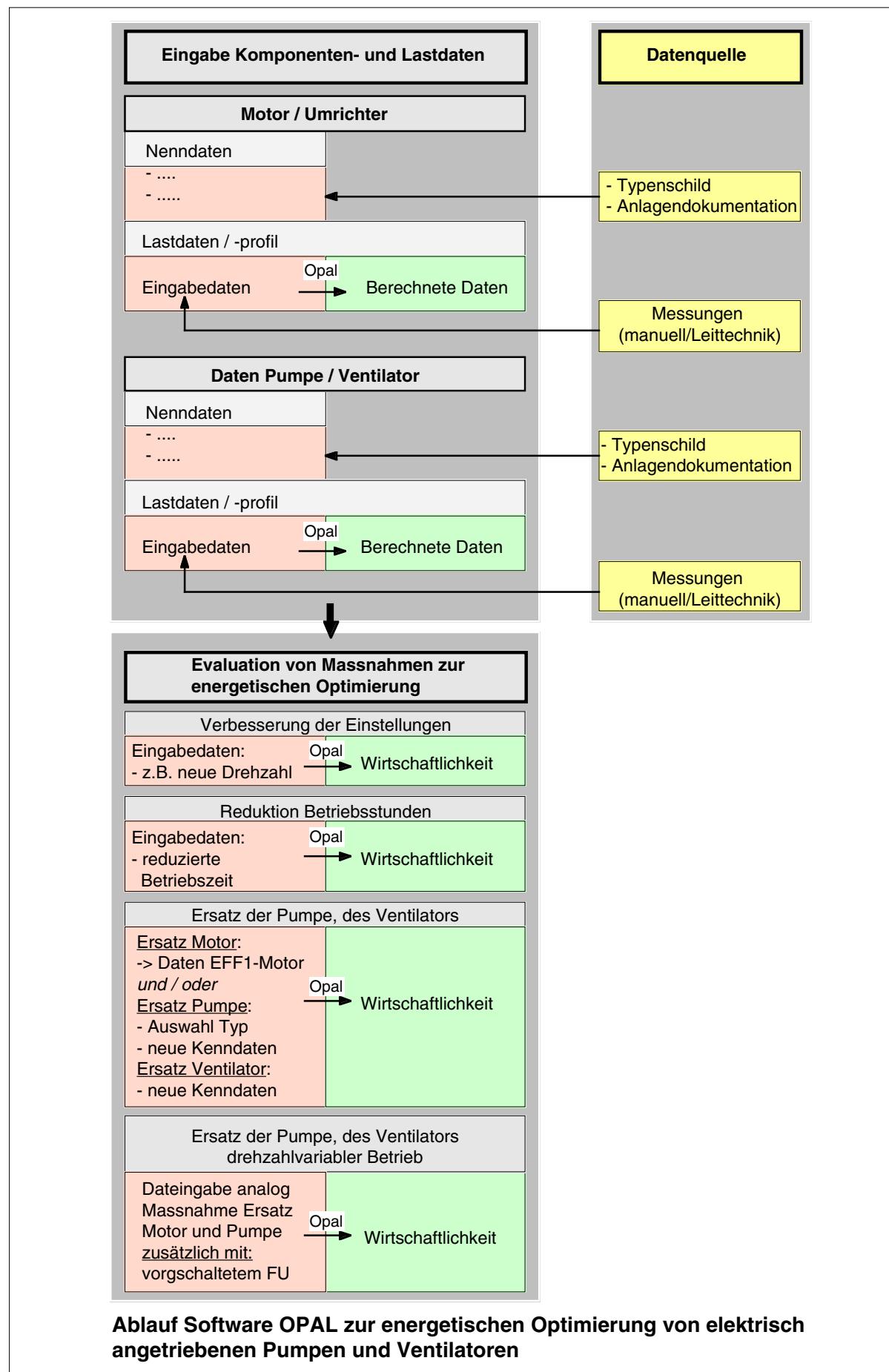
Der grösste Aufwand bei der energetischen Optimierung besteht in der Erfassung der Daten, insbesondere wenn die Betriebsdaten bei verschiedenen Lastfällen nicht über die Anlagenleittechnik erfasst, sondern manuell gemessen werden müssen.

<sup>7</sup> Motor Challenge Schweiz – Energieeffizienzsteigerung für elektrische Antriebe.  
Das Motor Challenge Programm ist ein freiwilliges Programm der Europäischen Kommission, das Industrieunternehmen helfen soll, den energetischen Wirkungsgrad ihrer Motor getriebenen Systeme zu verbessern (<http://energyefficiency.jrc.cec.eu.int/motorchallenge/>).

Teilnehmende Firmen verpflichten sich im Rahmen eines Aktionsplans zur Identifizierung und Realisierung von Energiesparmassnahmen.

MCP-Schweiz (<http://www.motorchallenge.ch>) ist eine eigenständige schweizerische Nonprofit-Organisation und verfolgt ideelle Ziele. Sie versteht sich als Landesorganisation des MCP-Europe.

<sup>8</sup> Semafor Informatik & Energie AG, Sperrstrasse 104B, CH-4057 Basel, [www.semafor.ch](http://www.semafor.ch)



## Anhang 6 Bestandesaufnahme und Möglichkeiten der Energieeinsparung bei Pumpensystemen

### A) Systembeschreibung

- Liste der grössten Pumpen
- Funktion der Pumpe
- Stromverbrauch der Pumpen
- Bedarfsprofil
- Betriebsstunden pro Jahr

### B) Dokumentation und Messung der Betriebsparameter

Potentielle Einsparmassnahmen

1. Schlechte Pumpenwahl oder schlechte Wartung
  - Exzessive Pumpenwartung
  - Drosselung zur Leistungsanpassung
  - Laute Pumpen
  - Änderungen gegenüber Auslegungsbedingungen
  - Pumpen mit bekannter Überkapazität
2. Schlechte Regelung
  - Alle Pumpen mit grossen Förderstrom- und/oder Druckschwankungen
  - Bypass-Ströme sind generell ein Hinweis auf uneffiziente Betriebsweise

# Anhang 7 Möglichkeiten der Verbrauchseinsparung bei Druckluftanlagen

## A. Allgemeine Systembeschreibung

- Geräteliste und Auslegung mit Angaben der Hauptanwendungen für Druckluft
- Netzdruck am Schlechtpunkt im Netz
- Sind Verbraucher mit unterschiedlichem Mindestdruck vorhanden?
- Betriebsstunden pro Jahr
- Bedarfsprofil
- Geforderte Luftqualität
- Druck nach Kompressor
- Druck hinter der Druckluftaufbereitung
- Wird das System abgeschaltet, wenn kein Druckluftbedarf besteht?
- Baujahr der Systemkomponenten

## B. Dokumentation und Messung der Betriebsparameter

- Bestimmung der Gesamtleckagemenge
- Ansauglufttemperatur im Verhältnis zur Umgebungstemperatur
- Druck vor der Aufbereitung
- Verhältnis von Last-/Leerlaufstunden
- Art und Funktionsweise der Systemsteuerung und einzelner Kompressorsteuerung
- Gesamtstromverbrauch
- Wird ständig das gesamte Druckluftnetz genutzt? Gibt es Abschaltungen für unbenutzte Teile?
- Ist an den Abnahmestellen Wasser im Verteilungsnetz?
- Schliessen die Endanwendungsgeräte ordnungsgemäß?

## Die potentiell bedeutendsten Energiesparmassnahmen

### 1. Drucklifterzeugung

- Einstellen von Reglern und Druckregelung
- Systemdruck optimieren
- Ansauglufttemperatur senken
- Kompressorsteuerung anpassen und optimieren
- Optimierung der Filterwechselintervalle
- Druckluftbehälter vergrößern
- Einsatz drehzahlgeregelter Kompressoren
- Prüfen, ob Netze mit verschiedenem Druck sinnvoll sind

### 2. Druckluftverteilung

- Leckagen reduzieren
- System in Zonen mit Druckregelung oder Absperrventilen einteilen. Nicht benutzte Leitungen abtrennen.
- Einsatz elektronischer Kondensatableiter
- Einsatz zusätzlicher Druckluftspeicher in der Nähe von Verbrauchern mit stark schwankendem Bedarf

### 3. Endgeräte

- Missbräuchliche Nutzung von Druckluft unterbinden
- Geräte mit Leckagen reparieren oder ersetzen
- Notwendigkeit gerätespezifischer Druckregler, Filter, Trockner überprüfen

Eine umfangreiche Zusammenstellung zu Grundlagen und zur Berechnung von Druckluftanlagen ist unter [www.drucklufttechnik.de](http://www.drucklufttechnik.de) zu finden.