

R1-Faktor zur Energieoptimierung von Müllverbrennungsanlagen in der praktischen Umsetzung

**Daniel Depta, Fabian Klönk-Markowis, Henning Feldmann,
Bernd Dibke**

1 Einleitung

Dieser Beitrag zielt darauf ab, Möglichkeiten aufzuzeigen, mit deren Hilfe die Energieeffizienz bei bestehenden Abfallverbrennungsanlagen im Zuge von Modernisierungs- und Sanierungsmaßnahmen erhöht werden kann. Dazu wird als Gütekriterium der von der europäischen Abfallrahmenrichtlinie beschriebene R1-Faktor herangezogen, welcher definiert, wie der Wirkungsgrad bei eben diesen Anlagen zu bestimmen ist. Es soll hier nicht darum gehen, den R1-Faktor anzuzweifeln oder in Frage zu stellen. Vielmehr wird das sich bietende Potenzial durch die vereinheitlichte Bewertungsmöglichkeit für den Typus der Abfallverwertungsanlage bei dem die Verbrennung im Vordergrund steht genutzt [Abfallrahmenrichtlinie].

Anlass zu diesem Beitrag ist der in Zukunft auftretende Bedarf, bestehende und in die Jahre gekommene Abfallverbrennungsanlagen zu sanieren und in diesem Zuge zu optimieren und deren Verfügbarkeit zu steigern. Dabei werden folgende von den Betreibern von Abfallverbrennungsanlagen geforderte technische Ziele zu erreichen sein:

Erhöhung:

- der Verfügbarkeit
- des Kesselwirkungsgrades
- des elektrischen Wirkungsgrades
- des thermischen Wirkungsgrades
- der Flexibilität gegenüber der Brennstoffzusammensetzung
- der Flexibilität in der Betriebsweise

Verminderung:

- des spezifischen Brennstoffverbrauchs
- des Zusatzbrennstoffs (Zünd- und Stützfeuerung)
- der Ausfallzeiten
- der anlageninternen Verluste

Eindeutig wird durch die Verbesserung der Anlagentechnik auch die Wirtschaftlichkeit der Anlage verbessert. Durch welche planerischen und technischen Maßnahmen diese Punkte umgesetzt werden können, ist im Folgenden detailliert ausgeführt. Zuvor werden die R1-Kennzahl und deren Bedeutung betrachtet.

2 Rahmenbedingungen

2.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

In der europäischen Abfallrahmenrichtlinie ist die Abfallverwertung definiert als:

„jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie andere Materialien ersetzen, die ansonsten zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen.“

Anhang 2 der europäischen Abfallrahmenrichtlinie enthält eine ausführliche Liste von Verwertungsverfahren. Darin ist weiterhin das Verwertungsverfahren R1 definiert als:

„Hauptverwendung als Brennstoff oder als anderes Mittel der Energieerzeugung *. Hierunter fallen Verbrennungsanlagen, deren Zweck in der Behandlung fester Siedlungsabfälle besteht, nur dann, wenn deren Energieeffizienz mindestens folgende Werte beträgt:

- * 0,60 für in Betrieb befindliche Anlagen, die nach geltendem Gemeinschaftsrecht vor dem 1. Januar 2009 genehmigt werden,
- * 0,65 für Anlagen, die nach dem 31. Dezember 2008 genehmigt werden,

wobei folgende Formel verwendet wird:

$$\text{Energieeffizienz} = \frac{(E_p - (E_f + E_t))}{(0,97 \times (E_w + E_f))}$$

Dabei ist:

E_p die jährlich als Wärme oder Strom erzeugte Energie. Der Wert wird berechnet, indem die produzierte Elektroenergie mit dem Faktor 2,6 und für gewerbliche Zwecke erzeugte Wärme mit dem Faktor 1,1 (GJ/Jahr) multipliziert wird.

E_f der jährliche Input von Energie in das System aus Brennstoffen, die zur Erzeugung von Dampf eingesetzt werden (GJ/Jahr).

E_w ist die jährliche Energiemenge, die im behandelten Abfall enthalten ist, berechnet anhand des unteren Heizwerts des Abfalls (GJ/Jahr).

E_i die jährliche importierte Energiemenge ohne E_w und E_f (GJ/Jahr).

0,97 ist ein Faktor zur Berechnung der Energieverluste durch Rost- und Kesselasche sowie durch Strahlung.

Diese Formel ist entsprechend dem Referenzdokument zu den besten verfügbaren Techniken für die Abfallverbrennung zu verwenden.“ [Abfallrahmenrichtlinie]

Aufgrund des oben genannten Zusammenhangs wird die Energieeffizienz auch als R1-Faktor oder R1-Kennzahl bezeichnet. Im weiteren Verlauf dieses Berichtes wird sie wie bisher als R1-Faktor bezeichnet.

2.2 Der R1-Faktor und dessen thermodynamische Bedeutung für die Abfallverbrennung

In E_p sind der elektrische und thermische Wirkungsgrad enthalten. In E_f sind die Flexibilität der Anlage und die spezifisch bessere Ausnutzung des Brennstoffs enthalten. E_i beinhaltet die Verminderung des Einsatzes anderer Brennstoffe. Des Weiteren ist in allen Werten die Erhöhung der Verfügbarkeit der Verbrennung des Abfalls enthalten.

All diese Größen sind nicht neu. Sie sind lediglich aus der Kombination bereits vorhandener und technisch genutzter Größen und Wirkungsgrade entstanden, denn es gilt:

Elektrischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_B} = \frac{(E_p - 1,1 \times P_Q)}{2,6 \times (E_w + E_f)}$$

Thermischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{th} = \frac{P_Q}{\dot{Q}_B} = \frac{(E_p - 2,6 \times P_e)}{1,1 \times (E_w + E_f)}$$

Brennstoffinput:

$$\dot{Q}_B = E_w + E_f$$

In den Gleichungen bedeute P_Q die Wärmeleistung, P_{el} elektrische Leistung, \dot{Q}_B die mit dem Brennstoffmassenstrom zugeführte Wärmemenge. Die Faktoren 2,6 und 1,1 tragen der unterschiedlichen Gewichtung bei der Erzeugung der jeweiligen Energieformen bei [Baehr].

Es zeigt sich anhand der Gleichungen, dass sich der R1-Faktor auch mit Hilfe von bereits existierenden Größen der Thermodynamik berechnen ließe. Damit ist auch

klar, dass der R1-Faktor keine neue, aus der Luft gegriffene Größe ist und sich die bewährten ingenieurmäßigen Bewertungskriterien aus der Theorie und Praxis weiterhin anwenden lassen. Wichtig sind nur die exakte Zuordnung der jeweiligen Energieströme und eine klare Definition der Bilanzgrenzen. Die Autoren schlagen vor, die Bilanzgrenzen für die Berechnung des R1-Faktors nur um den Energieinput (Abfall, Gas, Öl, Strom) und den Energieoutput (Strom, Wärme) zu ziehen. Stofflich relevante Zuordnungen, z. B. bezüglich der Wiederverwertung von Schlackebestandteilen, sollten in separaten Gütekriterien erfasst werden, da sonst über die eigentliche Bewertung der Anlagentechnik hinausgegangen wird.

3 Wege zur Erhöhung des R1-Faktors

Die Formel für den R1-Faktor macht deutlich, dass die bereits unter Kapitel 1 genannten Zieledefinitionen in diesem Wert widergespiegelt werden. Um den R1-Faktor zu erhöhen, müssen die Ergebnisse im Zähler erhöht und die im Nenner vermindert werden. Eine Berechnung der Formel für eine fiktive Abfallverbrennungsanlage macht deutlich, wie der R1-Faktor zu Stande kommt.

Fiktive Abfallverbrennungsanlage:

- Feuerungswärmeleistung: 100/60/40 MW
- Unterer Heizwert: 10,5 MJ/kg
- Energie zur Dampferzeugung: 1,5 % der Abfallenergiemenge
- Verfügbarkeit: 7.900 h/a
- Importierte Energiemenge: 0,5 % der Abfallenergiemenge
- Elektrische Bruttoleistung: *zu bestimmen*
- Prozesswärmeauskopplung: *zu bestimmen*

Mit Hilfe welcher Kombinationen von Wärmeauskopplung und Stromerzeugung man den R1-Faktor erreichen kann, wird durch folgende Überlegungen näher betrachtet.

Für die folgenden Grafiken wurden die oben genannten Parameter der fiktiven Abfallverbrennungsanlage verwendet. Zusammen mit diesen Angaben und einem gewünschten R1-Faktor bleibt die Größe E_p als einzige Variable bestehen. E_p ist gemäß der folgenden Formel abhängig von den beiden Größen der elektrischen Bruttoleistung P_{el} und der abgegebenen Prozesswärmeleistung P_w :

$$E_p = 2,6 \times P_{el} + 1,1 \times P_w$$

Gibt man nun einen der beiden Werte (P_{el} oder P_w) vor, so kann mit dem zuvor gewählten R1-Faktor der andere Wert bestimmt werden. Dazu müssen lediglich die

Formeln für R1 nach E_p umgestellt, für E_p eingesetzt und nach P_{el} oder P_w umgestellt werden. Man erhält:

$$P_w = [R1 \times 0,97 \times (E_w + E_f) + (E_f + E_i) - 2,6 \times P_{el}] \times \frac{1}{1,1}$$

$$P_{el} = [R1 \times 0,97 \times (E_w + E_f) + (E_f + E_i) - 1,1 \times P_w] \times \frac{1}{2,6}$$

Es ergeben sich dann bei einem vorgegebenen R1-Wert die folgenden Flächendiagramme. Diese Äquienergieeffizienzflächen sind dabei die möglichen Kombinationen von elektrischer Bruttoleistung und abgegebener Prozesswärmeleistung bei gleichzeitiger Erfüllung des R1-Faktors.

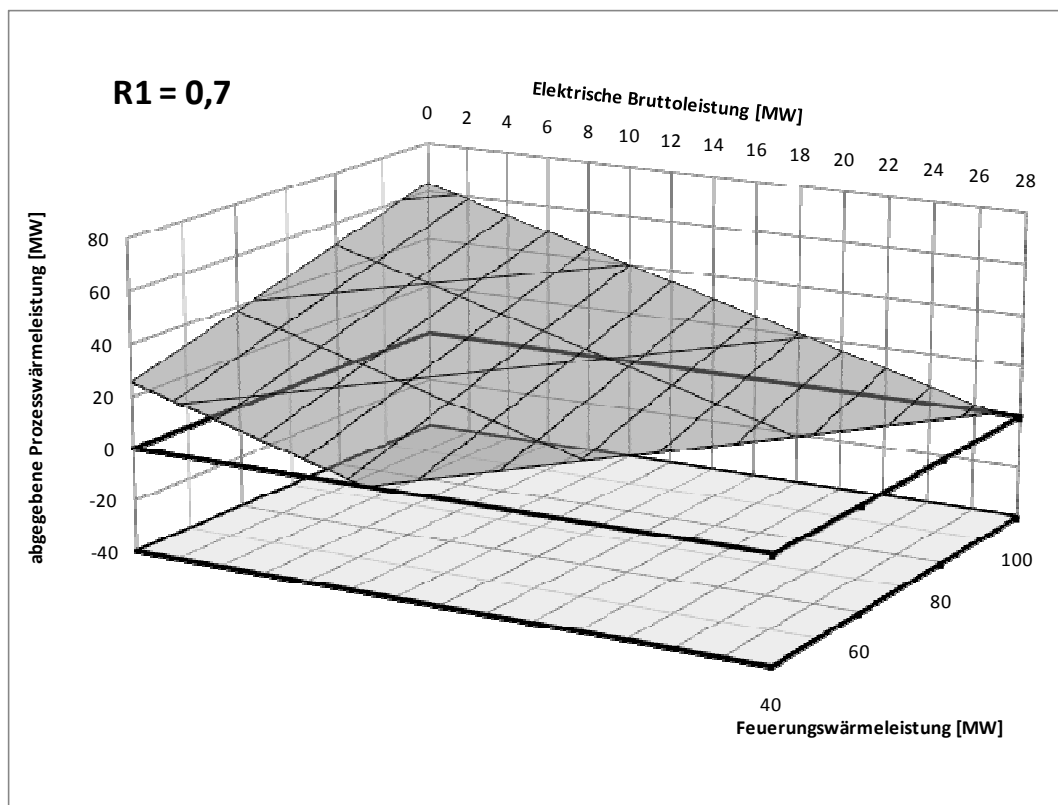


Abb. 1: Äquienergieeffizienzfläche für R1 = 0,7

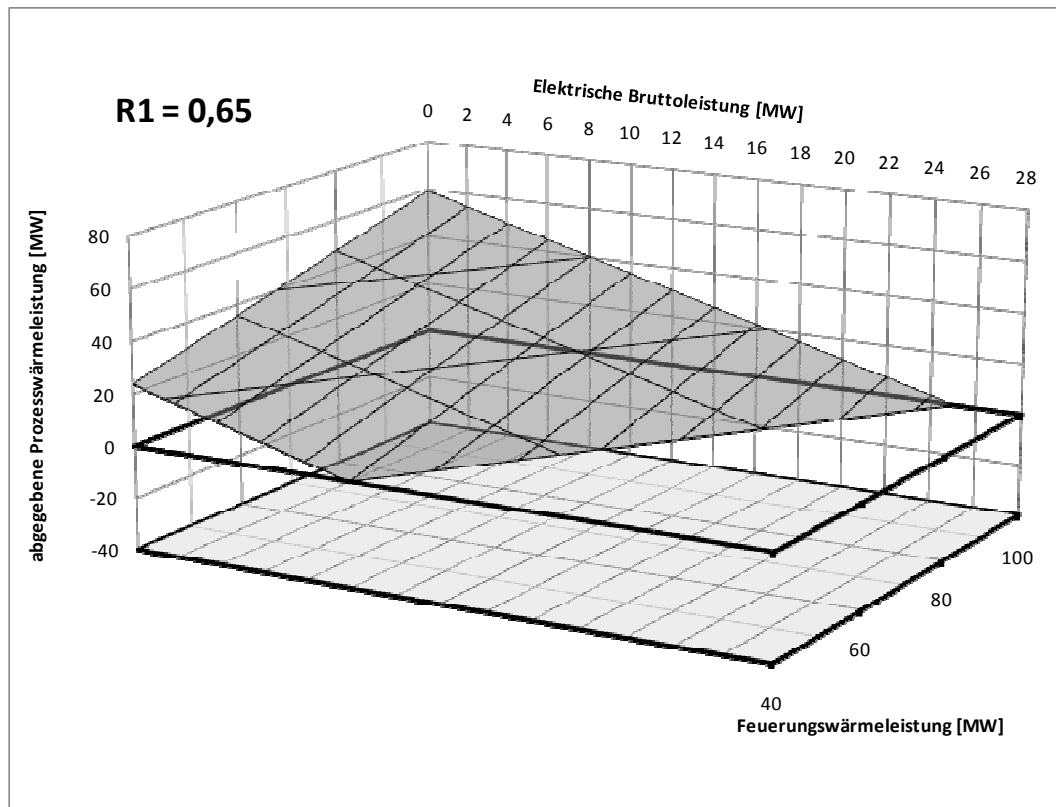


Abb. 2: Äquienergieeffizienzfläche für R1 = 0,65

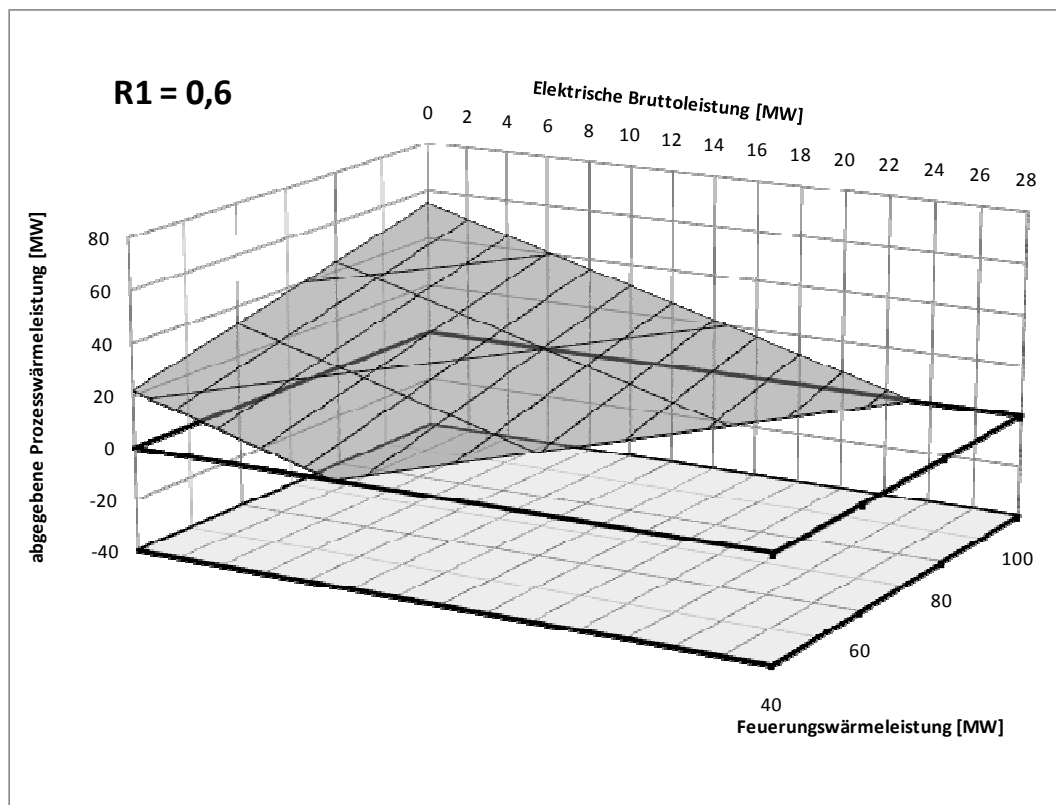


Abb. 3: Äquienergieeffizienzfläche für R1 = 0,6

Da die Funktionen linear sind, gelten diese Flächen für jede beliebige Anlagengröße mit dem vorgegebenen R1-Faktor und den oben genannten Randbedingungen. Be findet man sich mit der Performance einer Anlage über den dargestellten Flächen, so liegt man über den vorgegebenen R1-Faktoren. Liegt man unter dieser Fläche, erreicht die Anlagenkombination nicht den R1-Faktor des Diagramms. Mit Hilfe der Berührlinie auf der Bodenfläche (0 MW Prozesswärmeauskopplung) lässt sich der minimal notwendige elektrische Wirkungsgrad ermitteln, mit dem der R1-Faktor erreicht wird. Mit Hilfe der Berührlinie auf der linken Seitenwand (0 MW elektrische Energie) lässt sich der minimal notwendige thermische Wirkungsgrad ermitteln, mit dem der R1-Faktor erreicht wird.

Nachfolgend werden, gegliedert nach Systemen, verschiedene Möglichkeiten gesammelt, die Effizienz einer Abfallverbrennungsanlage zu erhöhen. Es sind nicht alle aufgezeigten Möglichkeiten der Optimierung für jede Anlage umsetzbar. Dies hängt im Einzelfall von der Anlagentechnik und dem Aufbau der Anlage ab. Welche ökonomischen Veränderungen sich durch einen Umbau oder eine Optimierung hinsichtlich der Betriebskosten ergeben, wird im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht näher betrachtet.

3.1 Feuerung und Kessel/Dampferzeuger

Absenken der Abgastemperatur hinter dem Kessel:

Häufig ist die Abgastemperatur hinter dem Kessel auf 200 °C bis 220 °C ausgelegt. Gelingt es, diese Temperatur auf 190 °C bis 180 °C abzusenken, erhöht dies den Kesselwirkungsgrad um bis zu 2,5 %. Mit der Erhöhung des Kesselwirkungsgrades wird die Dampfproduktion erhöht, was wiederum zu einer höheren Stromausbeute führt.

Erhöhung der Frischdampfparameter:

Natürlich sind die erzielbaren Frischdampfparameter abhängig von der Korrosivität der Rauchgase und damit von der Abfallzusammensetzung. Insbesondere der Chlorgehalt ist der limitierende Faktor, da durch die Entstehung von HCl die Endüberhitzer stärker zu Korrosion neigen, wenn die Rohrwandtemperaturen steigen. Häufig sind die Frischdampfparameter bei Altanlagen allerdings sehr niedrig gewählt. Frischdampftemperaturen von 380 °C können auf 400 °C angehoben werden. Dies kann z. B. erfolgen, wenn ein Überhitzerwechsel durchzuführen ist. Dabei kann gegebenenfalls ein korrosionsbeständigerer Stahl für den Überhitzer verwendet werden. Im Einzelfall ist diese Maßnahme detailliert zu prüfen. Der Kesselwirkungsgrad kann hier um bis zu 2 % gesteigert werden. Es soll jedoch nicht verschwiegen werden, dass mit der Erhöhung der Dampfparameter und der stärkeren korrosiven Belastung und dem damit verbundenen Abrieb der Heizflächen die Wartungs- und Instandhaltungskosten steigen können.

Rostwärme in das System zurückführen:

Wenn eine Rostkühlung mittels Wasser erfolgt, sollte die Wärme in den Hauptkondensatmassenstrom mittels eines Wärmetauschers eingekoppelt werden. Bei einigen Anlagen erfolgt die Kühlung über das Nebenkühlsystem. Die Wärme wird dann ungenutzt an die Umgebung abgegeben.

Umrüstung Verbrennungsluftgebläse:

Bei älteren Anlagen findet man häufig noch drallgeregeltere Verbrennungsluftgebläse. Hier kann häufig empfohlen werden, die Motoren entweder mit einem Frequenzumrichter auszurüsten oder einen neuen Motor mit Frequenzumrichter einzusetzen. Da gerade die Verbrennungsluftgebläse häufig unter Teillast betrieben werden, kann hier im Betrieb der Eigenstrombedarf gesenkt werden.

Optimierung der Kesselreinigung:

Um die Verfügbarkeit der Anlage zu erhöhen, sollte geprüft werden, ob das Kesselreinigungssystem optimiert werden kann. Eventuell ist auch eine Sprengreinigung möglich. Die Vorteile, die sich daraus ergeben, sind die bereits genannte Erhöhung der Verfügbarkeit der gesamten Anlage und die Verringerung der rauchgasseitigen Druckverluste und damit der elektrische Energiebedarf des Saugzuges.

3.2 Wasser-Dampfsystem

Kondensation der Brüden:

In vielen Anlagen wird Wärme über die Brüden aus dem Entgaser ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Hier können je nach Anlagengröße bis zu 250 kW der Wärme wieder in das System zurückgeführt werden, indem die Kondensationsenergie dem Hauptkondensatstrom zugeführt wird.

Leck- und Sperrdampfkondensator:

Der Leck- und Sperrdampf aus der Turbine wird häufig ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Wie bereits für die Kondensation der Brüden erwähnt, besteht auch hier die Möglichkeit die Kondensationsenergie zu nutzen und in den Hauptkondensatmassenstrom einzubringen.

Umrüstung der Speisewasserpumpen:

Hier gilt analog, was für die Umrüstung der Verbrennungsluftgebläse bereits beschrieben wurde.

Deionatvorwärmung:

Der nachzuführende Deionatstrom beträgt in der Regel 1 bis 2 % der gesamten Speisewassermenge. Das Deionat muss dem Speisewasserstrom zugeführt werden. Da das Deionat meistens aus einem Speichertank entnommen wird und lediglich die Temperatur der Umgebung aufweist, kann unter Umständen die Aufwärmung des Wassers mit Hilfe der Wärme aus dem Nebenkühlsystem und einem Wärmetauscher erfolgen. Je nach Anlagengröße und Deionatmenge lassen sich dadurch bis zu 100 kW Wärme zurückgewinnen, da die Wärme aus dem Nebenkühlsystem sonst an die Umgebung abgegeben würde.

Feuerleistungsregelung:

Die Feuerleistungsregelung bei Altanlagen entspricht in der Regel nicht dem neusten Stand der Technik. Die Systeme sind oft träge, was häufig dazu führt, dass die Stützfeuerung hinzugeschaltet werden muss. Damit steigt der Verbrauch von Öl oder Erdgas, womit die Stützbrenner betrieben werden. Um dem entgegen zu treten, kann die Regelung der Feuerung auf den neuesten Stand der Technik gebracht werden. Das impliziert die Erneuerung der Mess- und Diagnosesysteme sowie die Anpassung der Softwaresysteme. In Kombination mit der Erneuerung der Stützbrenner können somit die Betriebskosten aufgrund des geringeren zusätzlichen Brennstoff-Verbrauchs erheblich gesenkt werden.

3.3 Abgasreinigung

Umrüstung der Abgasreinigung:

Bei Abgasreinigungen die zur Entstickung des Abgases das SCR-Verfahren anwenden und zuvor mit dem Absorbens $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oder direkt mit Kalkmilch entschwefeln, besteht gegebenenfalls die Möglichkeit auf Natriumhydrogencarbonat (NaHCO_3 , Bicar) als Absorbens zu wechseln. Dadurch kann die Rauchgastemperatur hinter dem Kessel abgesenkt werden, was zu einem höherem Kesselwirkungsgrad führt. Bei der Umrüstung auf eine Niedertemperatur-SCR und einem Entfallen der Wiederaufheizung kann die übrige Wärmeenergie im Rauchgas in den Prozess eingekoppelt werden.

Umrüstung Saugzuggebläse:

Hier gilt analog, was für die Umrüstung der Verbrennungsluftgebläse bereits beschrieben wurde.

3.4 Energienutzung

Die Nutzung der Wärme und des Stroms ist natürlich vom Standort abhängig. Manchmal bietet sich die Möglichkeit, einem am Standort neu angesiedeltem Indust-

riebetrieb Prozesswärme bereitstellen zu können. Dies führt zu einer Steigerung der Gesamtenergieausnutzung der Anlage. Ebenso bietet der vielerorts vorangetriebene Ausbau der Fernwärmeversorgung neue Möglichkeiten der Energieauskopplung für eine existierende Anlage. Gegebenenfalls muss bei derartigen Veränderungen der Energieauskopplung die Dampfturbine modifiziert oder erneuert werden.

Die Energienutzung in Form von Eigenstrombedarf und interner Wärmenutzung kann bei fast allen Altanlagen verbessert werden. Als Herangehensweisen bieten sich die Pinch Point Analyse sowie die Erstellung von Grand Composite Curves, beide nach [Linnhoff], an. Damit wird es ermöglicht, komplexe Prozesse der Wärmeintegration zu untersuchen und die minimalen Heiz- und Kühlleistungen zu bestimmen. Zur Aufteilung der Heiz- und Kühlmedien, welche auf unterschiedlichen Temperaturniveaus vorliegen können, dient die Grand Composite Curve [Leithner]. Nachfolgend sind beispielhafte Abbildungen einer Composite Curve und der Eintragung des Pinch Points sowie eine Grand Composite Curve dargestellt.

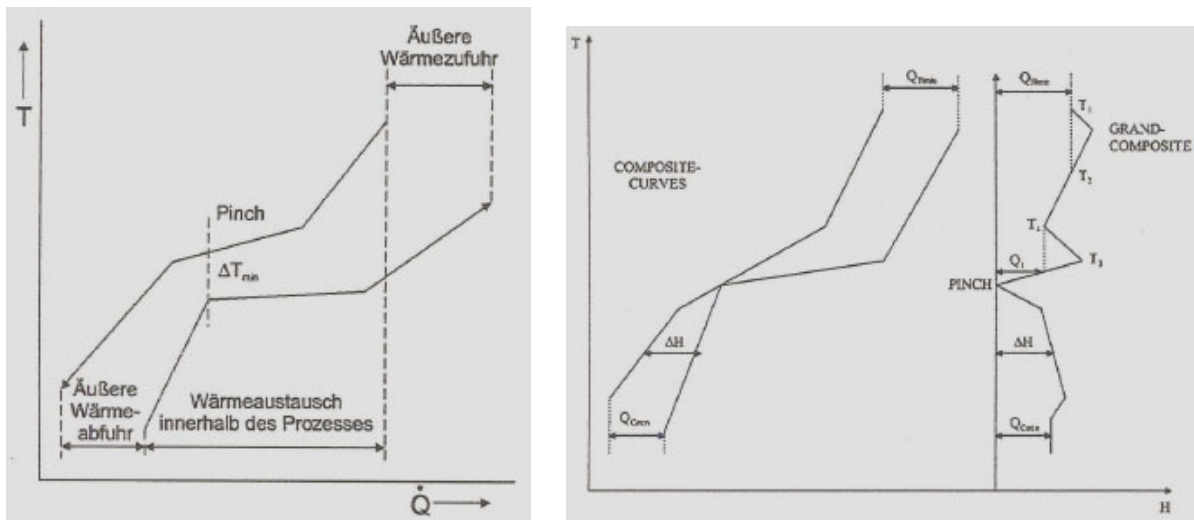


Abb. 4: Composite Curve und Grand Composite Curve

Für die Bewertung, Analyse, Dimensionierung, Berechnung und Auslegung verschiedener Komponenten, die an der Energieerzeugung und Nutzung in einer Anlage beteiligt sind, muss eine Software angewendet werden, die all diese Möglichkeiten bietet. Dabei kann die Software ENBIPRO genutzt werden. Diese ermöglicht u. a. die Nachbildung komplexer Systeme oder die Dimensionierung und Auslegung eines solchen Systems [ENBIPRO].

3.4.1 Weitere allgemeine Maßnahmen

Druckluftsystem:

Bei alten Bestandsanlagen weist das Druckluftsystem häufig Leckstellen auf, sodass Teile der Druckluft entweichen können. Das führt zu einem höheren Stromverbrauch der Druckluftkompressoren. Eine Analyse des gesamten Druckluftsystems in einer Anlage und die Beseitigung von Leckstellen im Leitungssystem können dazu beitragen, dass der Eigenstrombedarf erheblich sinkt. Druckluft ist in einer Anlage in der Regel das teuerste Betriebsmittel und weist daher ein hohes Einsparpotenzial bezüglich der Betriebskosten auf.

Nebenkühlsystem:

Das Nebenkühlsystem kühlt die Wärme aus verschiedenen Systemen in der Anlage herunter. Meist liegt die Wärme in einem niedrigen Temperaturbereich von ca. 50 °C vor. Je nach Anlagentyp und Möglichkeiten kann die Wärme teilweise dazu genutzt werden, einen kalten Rücklaufstrom aufzuwärmen. Dies kann z. B. der Fall bei hohen Volumenströmen von kaltem Wasser sein, wie es bei Rückläufen von Kondensat aus Prozesswärmeversorgungen oder bei Wassernachspeisungen aus kaltem Brunnen- oder Trinkwasser vorkommen kann. Hier können je nach Volumenstrom mehrere kW Wärme eingespart dem Prozess wieder zurückgeführt werden.

Frequenzumrichter:

Wie bereits für die großen Gebläse und die Speisewasserpumpen erläutert, sollten auch bei kleineren Verbrauchern und Motoren die Möglichkeiten geprüft werden, Frequenzumrichter einzusetzen. Dadurch können im Teillastbetrieb Betriebskosten eingespart und die Flexibilität insgesamt erhöht werden.

4 Schlusswort

Es konnte gezeigt werden, dass die Bedeutung des R1-Faktors mit vorhandenen thermodynamischen Größen korreliert. Die Erhöhung des R1-Faktors und schließlich die Erhöhung der Energieeffizienz von Müllverbrennungsanlagen wurden anhand einiger Beispiele aufgelistet. Diese Liste ist keinesfalls vollständig. Es gibt bei jeder Anlage noch Maßnahmen, die speziell nur auf diese Anlage zutreffen. Diese Maßnahmen sind einzeln oder in Kombination dazu geeignet, die Energieeffizienz zu erhöhen. Für einen Betreiber bietet es sich an, untersuchen zu lassen, welche Optimierungsmaßnahmen gegebenenfalls umsetzbar sind. Auf diese Weise kann ein Sanierungskonzept für eine Altanlage erarbeitet werden, welches bei einer Umsetzung zu einer Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit mit gleichzeitiger Verringerung der spezifischen Betriebskosten und Steigerung der Einnahmen für Strom und Wärme führen kann. Die Erfüllung oder die Überfüllung des R1-Faktors hat auch im Hinblick auf die Wirksamkeit gegenüber der Öffentlichkeit positive Auswirkungen.

Literaturverzeichnis

- [Abfallrahmenrichtlinie] – RL 2008/98/EG über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien
- [Baehr] – Baehr, H. D., Kabelac, S.: Thermodynamik, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [ENBIPRO] – Leithner, R., Schlitzberger, C., Hauschke, A., Nielsen, L., Zindler, H., Witkowski, A., Depta, D., Institut für Wärme- und Brennstofftechnik, Energiebilanzprogramm zur Berechnung von sämtlichen Kraftwerkskreisläufen
- [Leithner] – Leithner, R., IWBT, 2005, Vorlesungsskript für Umweltschutztechnik
- [Linnhoff] – Linnhoff, B., The institution of Chemical Engineers, Rugby 1982, Process integration for the efficient use of energy