

Anwendung von Energiekennzahlen für Abfallverbrennung

Oliver Gohlke und Martin J. Murer

1.	Thermodynamische Kennzahlen.....	5
1.1.	Wirkungsgrad.....	5
1.2.	Stromanteil.....	5
1.3.	Stromverlustkennzahl	6
1.4.	Gesamtenergienutzungsgrad	6
1.5.	Exergieeffizienz.....	6
2.	Politische Kennzahlen	9
2.1.	EU-Abfallrahmenrichtlinie	9
2.2.	Niederländische SDE-Zuschüsse	11
2.3.	Österreichisches Ökostromgesetz.....	11
2.4.	Schweizer Stromversorgungsverordnung	12
2.5.	Japanische MOE-Richtlinie	13
3.	Besonderheiten bei der Anwendung der Kennzahlen.....	14
3.1.	Systemgrenzen	14
3.2.	Bewertung der Biomasse	17
3.3.	Stromerzeugung (Rostfeuerung, Kessel und Turbine)	18
3.4.	Kraft-Wärme-Kopplung	20
3.5.	Vergleich der relativen Wertigkeit von Strom und Wärme	23
3.6.	Steigerung der Stromproduktion durch solarthermische Komponenten	24
4.	Schlussfolgerungen	26
5.	Literatur.....	27

Die Zielsetzung der Behandlung von Hausmüll war lange die Beseitigung der Abfälle, wobei die Hygienisierung und die Minimierung von Umweltbelastungen im Vordergrund standen. In der heutigen Zeit sind Entwicklungen wesentlich, die zusätzlich den Anforderungen an Energieeffizienz und Ressourcenschonung entsprechen. Darüber hinaus werden Technologien vorangetrieben, die zur Vermeidung von Deponierung und Förderung von Recycling führen.

Auch im Bereich der Abfallverbrennung bringt die Forderung nach Ressourcenschonung und Energieeffizienz die Technologieentwicklung voran. Bei den heute typischen Marktpreisen für Strom und den vorliegenden Annahmehöhen für den Abfall ist es jedoch vielfach noch nicht lohnend in Maßnahmen zur Wirkungsgraderhöhung zu investieren.

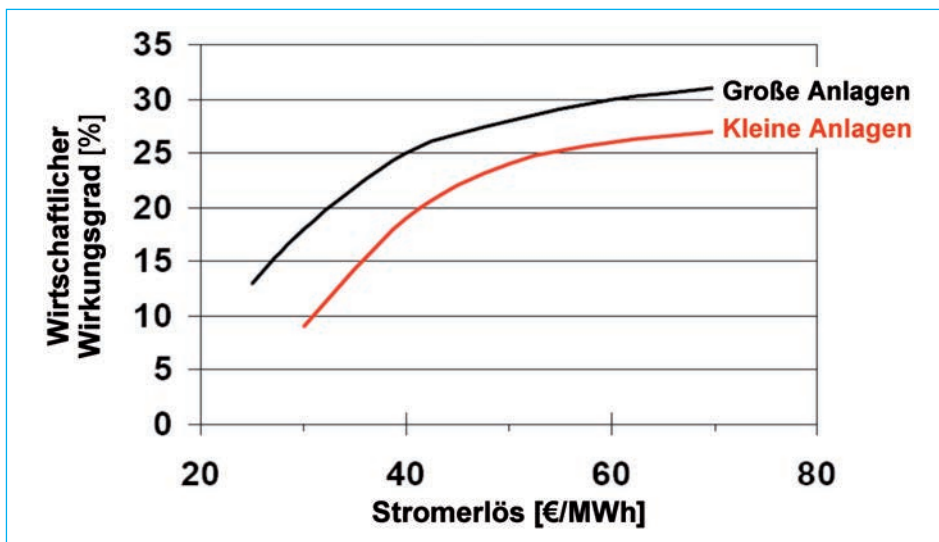


Bild 1: Wirtschaftlicher Wirkungsgrad über Stromerlös (Beispielhafte Darstellung angepasst von Wandschneider; Wirtschaftlicher Wirkungsgrad = Kosten für Erreichen dieses Wirkungsgrades rechnen sich noch über den Stromerlös)

Quelle: Wandschneider, J.: Optimierungsmaßnahmen zur Steigerung des Wirkungsgrades. In: Müll und Abfall (2007), Nr. 5, S. 215-221

Im Gegenteil: Wenn Abfallverbrennungsanlagen in Ihrer Kapazität durch die Dampfmenge begrenzt sind, kann es im Extremfall sogar lohnend sein, wenn durch eine den Wirkungsgrad verringernde Maßnahme der Abfalldurchsatz erhöht werden kann (bei gleicher Dampfmenge). Es ist deswegen naheliegend, dass Anreize für die Effizienzsteigerung bei der Abfallverbrennung notwendig sind. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass klassische Abfallverbrennungsanlagen in etwa CO_2 neutral sind und damit einen großen Fortschritt gegenüber Depo-nien darstellen, die 400 bis 1.000 kg CO_2 -Äquivalent pro Tonne Abfall emittieren. Abfallverbrennungsanlagen mit hohen Wirkungsgraden der Stromerzeugung und in noch weiterem Maße mit Kraft-Wärme-Kopplung ermöglichen allein schon durch die Substitution fossiler Brennstoffe eine CO_2 -Einsparung von 200 bis 350 kg pro Tonne Abfall [4].

Aber wie kann man die Energieeffizienz möglichst einfach so berechnen, dass der damit einhergehende CO_2 -Einspareffekt sinnvoll abgebildet wird?

In diesem Beitrag werden einige der üblichen thermodynamischen Kennzahlen aus der Kraftwerkstechnik in ihrer Anwendung auf die Abfallverbrennung diskutiert. Darüber hinaus werden auch die wichtigsten politischen Kennzahlen

vorgestellt, die direkt Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit/Energieeffizienz einer Abfallverbrennungsanlage haben können. Im dritten Teil folgen einige Beispiele von Wirkungsgradberechnungen, wobei aufgezeigt wird, wie schwierig es ist im Detail eine möglichst einfache und doch für alle Anwendungsfälle sinnvolle Kennzahl für die Aufgabenstellung zu finden (siehe auch [3, 5]). Die Beispiele beschäftigen sich auch mit den Fragestellungen der Unterscheidung von biogenen und fossilem Kohlenstoff, mit dem Vergleich der Wertigkeit von Wärme und Strom bei Kraft-Wärme Kopplung und der Wirkungsgradberechnung bei Abfallverbrennung mit solarthermischem Wärmeeintrag.

1. Thermodynamische Kennzahlen

1.1. Wirkungsgrad

Effizienzindikatoren sind anlagenspezifische Kennzahlen, die einen leistungs- und durchsatzunabhängigen Vergleich von Anlagen zulassen. In diesem Abschnitt werden thermodynamische Kennzahlen beschrieben. In Kapitel 2 folgen dann die politischen Kennzahlen, die auf gesetzlichen Regelungen basieren, die im Bereich der Abfallwirtschaft verwendet werden.

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} \quad \text{Formel 1}$$

Der Wirkungsgrad ist allgemein definiert als der Quotient von Nutzen und Aufwand. Für einen energetischen Wirkungsgrad ist der Aufwand die durch den Brennstoff zugeführte Energiemenge. Nutzen hingegen kann der produzierte Strom an den Klemmen des Generators (elektrischer Bruttowirkungsgrad $\eta_{\text{el.,brutto}}$), die an das Stromnetz gelieferte elektrische Energie (elektrischer Nettowirkungsgrad $\eta_{\text{el.,netto}}$) oder die produzierte Prozess- oder Fernwärme (Wärmenutzungsgrad oder auch Heizzahl η_{WNG}) sein. Die Angabe erfolgt dimensionslos zwischen 0 und 1 oder in Prozent.

$$\eta_{\text{el brutto}} = \frac{P_{\text{el brutto}}}{\dot{Q}_{\text{Brennstoff}}} \quad \text{Formel 2}$$

$$\eta_{\text{el netto}} = \frac{P_{\text{el netto}}}{\dot{Q}_{\text{Brennstoff}}} \quad \text{Formel 3}$$

$$\eta_{\text{WNG}} = \frac{\dot{Q}_{\text{WAK}}}{\dot{Q}_{\text{Brennstoff}}} \quad \text{Formel 4}$$

WAK: Wärmeauskopplung

Die Besonderheit bei der Verwendung von Abfall als Brennstoff ist, dass die zugeführte Energiemenge nur indirekt berechnet werden kann, weil weder der Heizwert noch die Brennstoffmenge ausreichend genau direkt bestimmbar sind. Eine Beschreibung für die indirekte Wirkungsgradberechnung findet man in [2, 6].

1.2. Stromanteil

Der Stromanteil ist das Verhältnis zwischen der Nettostromproduktion und der gesamten gelieferten Energie, sprich der Summe aus Wärme- und Stromproduktion.

Für reine Stromproduktion in Kraftwerken ist der Stromanteil 1, für reine Wärmeproduktion in Heizwerken ist der Stromanteil 0 und für eine Kombination in Heizkraftwerken liegt der Wert zwischen 0 und 1.

$$S = \frac{P_{\text{el netto}}}{P_{\text{el netto}} + \dot{Q}_{\text{WAK}}} = \frac{\eta_{\text{el netto}}}{\eta_{\text{el netto}} + \eta_{\text{WNG}}} \quad \text{Formel 5}$$

1.3. Stromverlustkennzahl

Die Stromverlustkennzahl gibt das Verhältnis von durch die Wärmeproduktion verlorener elektrischer Energie und der ausgekoppelten Wärme an [7]. Grundsätzlich ist diese Kennzahl konstant für unterschiedlich hohe Wärmenutzungsgrade. Die Höhe der Stromverlustkennzahl wird maßgeblich von der Art der Wärmeauskopplung und dem Druck im Kondensator bestimmt. Stromverlustkennzahlen unterschiedlicher Anlagen können nur bei gleichem Kondensationsdruck verglichen werden, oder es muss eine entsprechende Umrechnung erfolgen. Für eine Gegendruckturbine ist eine Umrechnung auf jeden Fall erforderlich.

$$\vartheta = \frac{P_{\text{el Verlust}}}{\dot{Q}_{\text{WAK}}} = \frac{P_{\text{el netto}} (\dot{Q}_{\text{WAK}} = 0) - P_{\text{el netto}} (\dot{Q}_{\text{WAK}})}{\dot{Q}_{\text{WAK}}} = \frac{\eta_{\text{el netto}} (\eta_{\text{WNG}} = 0) - \eta_{\text{el netto}} (\eta_{\text{WNG}})}{\eta_{\text{WNG}}} \quad \text{Formel 6}$$

Wenn keine Wärme ausgekoppelt wird, ist die Stromverlustkennzahl Null, da die maximal mögliche Strommenge produziert wird.

1.4. Gesamtenergienutzungsgrad

Beim Gesamtenergienutzungsgrad werden der elektrische Nettowirkungsgrad und der Wärmenutzungsgrad einfach aufsummiert, ohne eine Gewichtung der Wärme vorzunehmen. Die Angabe erfolgt auch hier dimensionslos zwischen 0 und 1 oder in Prozent.

$$\eta_{\text{GENG}} = \eta_{\text{el netto}} + \eta_{\text{WNG}} \quad \text{Formel 7}$$

1.5. Exergieeffizienz

Der Gesamtenergienutzungsgrad hat den sehr maßgeblichen Nachteil, dass nicht zwischen der Wertigkeit unterschiedlicher Energieformen unterschieden wird. In unserer Lebenswirklichkeit ist jedoch Wärme vielfach im Überfluss vorhanden – in der Klimadiskussion sogar als maßgebliches Problem – und es besteht eher Mangel an Energieformen, die auch für mechanische Anwendungen in Frage kommen (Fahrzeuge, Maschinen, Motoren). Hier kommt dann der Begriff der Exergie ins Spiel, der folgendermaßen erklärt wird [8].

Die mechanischen Energieformen und die elektrische Energie gehören zu den Energieformen, die sich unbeschränkt in jede andere Energieform umwandeln lassen, sofern nur der Prozess der Wandlung reversibel erfolgt. Die Wandelbarkeit

der thermischen Energien unterliegt hingegen Einschränkungen, die ihnen der zweite Hauptsatz der Thermodynamik auferlegt. Thermische Energien bestehen demnach aus zwei Anteilen, einem unbegrenzt in andere Formen wandelbaren Teil und einem nicht mehr verwertbaren Teil:

$$\text{Energie} = \text{Exergie} + \text{Anergie}$$

Die mechanischen Energien und die elektrische Energie sind nach dieser Definition ausschließlich Exergien, weshalb man sie manchmal auch als *Edelenergien* bezeichnet. Vereinfacht ausgedrückt kann die Exergie als arbeitsfähiger Teil der Energie bezeichnet werden. Die Exergieeffizienz setzt sich somit zusammen aus dem gelieferten Strom und dem arbeitsfähigen Teil der gelieferten Wärme, wobei dieser Anteil mit einem temperaturabhängigen Exergiefaktor berechnet wird.

$$\eta_{\text{ex}} = \eta_{\text{el netto}} + f_{\text{ex}} \cdot \eta_{\text{WNG}} \quad \text{Formel 8}$$

Dieser Exergiefaktor entspricht dem Carnot-Wirkungsgrad¹ mit der Umgebungstemperatur als Temperatur der Wärmesenke und der mittleren Temperatur, bezogen auf die produzierte Wärme, als Temperatur des Wärmereservoirs.

$$f_{\text{ex}} = 1 - \frac{T_0}{T_{\text{WAK}}} \quad \text{Formel 9}$$

2. Politische Kennzahlen

In Europa gibt es im Bereich der Abfallwirtschaft eine Reihe von politischen Kennzahlen, die darauf ausgerichtet sind, die Energieeffizienz zu beschreiben und letztendlich Anreize geben sollen, diese zu erhöhen. Die Festlegung erfolgt in Form von Gesetzen, Richtlinien, Verordnungen oder Förderprogrammen. In der EU betrifft dies die Abfallrahmenrichtlinie (R1), das österreichische Ökostromgesetz oder das niederländische SDE-Programm für die Förderung von Strom, der mit nachhaltigen Energien produziert wird. Außerhalb der EU beinhaltet die Schweizer Stromversorgungsverordnung Kennzahlen für die Energieeffizienz.

2.1. EU-Abfallrahmenrichtlinie

Die Europäische Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle vom 19. November 2008, im Folgenden EU-Abfallrahmenrichtlinie genannt, beinhaltet im Anhang II eine Formel, die es erlaubt, unter bestimmten Bedingungen Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle als so genannte R1-Verwertungsverfahren (*Hauptverwendung als Brennstoff oder als anderes Mittel der Energieerzeugung*) einzustufen [9].

$$R1 = \frac{(E_p - (E_f - E_i))}{0,97 \cdot (E_w + E_f)} \quad \text{Formel 10}$$

¹ Der höchste theoretisch mögliche Wirkungsgrad bei Umwandlung von Wärme- in mechanische oder elektrische Energie.

In diese Formel fließen die produzierten Strom- und Wärmemengen als Äquivalenzenergie E_p , fossile Zusatzbrennstoffe E_f , sonstige Energieströme E_i und der Energieinhalt des Abfalls E_w ein. Der Faktor 0,97 berücksichtigt nicht nutzbare Verluste durch Schlackenwärme, Unverbranntes, Abstrahlung u.ä. Bei der Berechnung wird die Art der ausgekoppelten Energie unterschiedlich gewichtet: Strom mit Faktor 2,6, Wärme mit Faktor 1,1, Prozessdampf mit Faktor 1. Diese politisch festgelegten Werte haben folgenden Hintergrund:

- Der Faktor 2,6 ergibt sich aus dem Bedarf an Dampfenergie, den ein durchschnittliches europäisches Kraftwerk (nicht speziell bezogen auf Abfall!) mit einem durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrad von 38 % zur Erzeugung von 1 MW elektrischen Strom benötigt (2,6 MW Dampf für 1 MW Strom).
- Der Faktor 1,1 für Wärme ergibt sich aus dem Bedarf an Dampfenergie, die durchschnittlich (nicht speziell bezogen auf Abfall!) bei einem thermischen Wirkungsgrad von 91 % zur Erzeugung von 1 MW externer thermischer Energie benötigt wird (1,1 MW Dampf für 1 MW Wärme).

Für das Erreichen des Verwertungsstatus müssen Altanlagen einen R1-Wert von mindestens 0,6 und Neuanlagen (ab dem 1.1.2009 genehmigt) von 0,65 aufweisen. Ausschlaggebend für die Bestimmung des R1-Wertes sind Daten, die über ein ganzes Jahr ausgewertet werden.

Die R1-Formel kann, falls kein fossiler Zusatzbrennstoff und keine sonstigen Energieströme verwendet werden, vereinfacht wie folgt geschrieben werden:

$$R1 = \frac{E_p}{0,97 \cdot E_w} = \frac{2,6 \cdot E_{el \text{ brutto}} + 1,1 \cdot \dot{Q}_{WAK}}{0,97 \cdot E_w} = \frac{2,6 \cdot \eta_{el \text{ brutto}} + 1,1 \cdot \eta_{WNG}}{0,97} \quad \text{Formel 11}$$

Außerdem ist der R1-Wert bei bekannter Stromverlustkennzahl nur noch vom Wärmenutzungsgrad abhängig, da alle anderen Einflussfaktoren konstant sind.

$$R1 = \frac{1,1 - 2,6 \cdot \vartheta}{0,97} = \eta_{WNG} + \frac{2,6}{0,97} \cdot \eta_{el \text{ brutto}} \quad (\eta_{WNG} = 0) \quad \text{Formel 12}$$

Um zu errechnen, wie hoch der benötigte Wärmenutzungsgrad für das Erreichen des Verwertungsstatus für einen bestimmten Bruttowirkungsgrad sein muss, kann Formel 13 verwendet werden. Diese Formel beschreibt auch die Gerade im Bruttowirkungsgrad-Wärmenutzungsdiagramm [10].

$$\eta_{WNG \text{ min} R1} = \frac{0,65 \cdot 0,97 - 2,6 \cdot \eta_{el \text{ brutto}}}{1,1} \quad \text{Formel 13}$$

In [12] wird gezeigt, dass in der Praxis eine brauchbare Korrelation des R1 mit den Faktoren 2,6 und 1,1 für Strom und Wärme zur Exergieeffizienz besteht (siehe Kapitel 1.5. Exergieeffizienz). Bei 279 untersuchten europäischen Anlagen mit ausreichendem Datenmaterial liegt der mittlere R1 bei 0,66. Die Exergieeffizienz in Prozent ergibt sich über die lineare Korrelation als ein Wert, der dem 27-fachen R1 entspricht. Ein R1 von 0,65 und 1 entsprechen einer korrelierten Exergieeffizienz von 18 % und 27 %.

2.2. Niederländische SDE-Zuschüsse

In den Niederlanden erhalten die Anlagenbetreiber nach dem SDE-Programm (Stimulering Duurzame Energieproductie) für den produzierten Strom aus KWK seit 2003 eine Vergütung in Abhängigkeit vom [11]. Dazu wird ein Vergleichswirkungsgrad gebildet, bei dem die Wärme mit dem Faktor zwei Drittel im Vergleich zu Strom gewichtet wird.

$$\eta_{\text{SDE}} = \frac{E_{\text{el netto}} + \frac{2}{3} \cdot Q_{\text{WAK}}}{Q_{\text{Brennstoff}}} \quad \text{Formel 14}$$

Liegt dieser SDE-Wirkungsgrad über 22 %, erhält der Anlagenbetreiber zusätzliche Zuschüsse; diese steigen überproportional stark an für Wirkungsgrade bis 30 % [13].

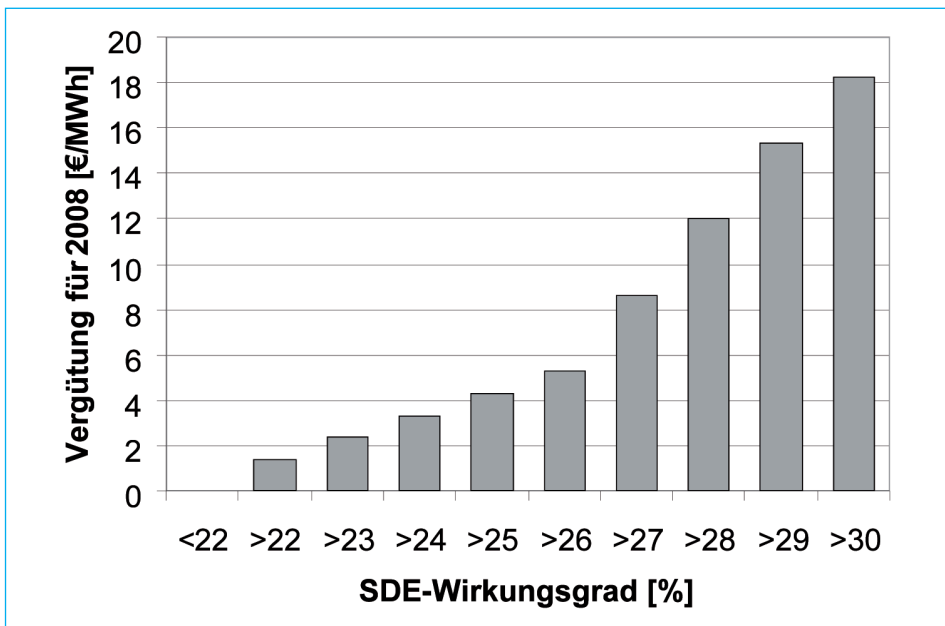


Bild 2: SDE-Zuschüsse in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad (Vergütung) bezogen auf MWh produzierten Strom

Für 2010 wird von den Instituten ECN und KEMA im Auftrag des niederländischen Wirtschaftsministeriums (*Ministerie van Economische Zaken*) eine Förderung über 15 Jahre von 52, 56 und 62 EUR/MWh empfohlen (für Anlagen mit normalem, optimierten und sehr hoher Wirkungsgrad) [14].

2.3. Österreichisches Ökostromgesetz

In Österreich hat der Wirkungsgrad ebenfalls Einfluss auf die Vergütung, die der Anlagenbetreiber für den produzierten Strom aus KWK-Anlagen erhält. Diese

ist dabei an die Einhaltung des im 2006 novellierten österreichischen Ökostromgesetzes [16] definierten Brennstoffausnutzungsgrads gekoppelt, welcher nach folgender Formel mindestens 60 % bzw. 0,6 erreichen muss:

$$\frac{2}{3} \cdot \frac{W}{B} + \frac{E}{B} \geq 0,6$$

$$0,6 \leq \frac{2}{3} \cdot \frac{W}{B} + \frac{E}{B} = \frac{\frac{2}{3} \cdot W + E}{B}$$

Formel 15

Dabei ist

W = Wärmemenge (kWh_{th}), die an das öffentliche Fernwärmenetz abgegeben oder als Prozesswärme wirtschaftlich genutzt wird

E = elektrische Energie (kWh_{el}), die an das öffentliche Elektrizitätsnetz abgegeben oder an der Generatorklemme gemessen wird

B = gesamter Brennstoffeinsatz in kWh

Die Berechnung des Effizienzkriteriums hat auf monatlicher Basis pro Anlage oder pro Betreiber zu erfolgen. *Auf ein Gesamtoptimum hinsichtlich Treibhausgasminderungen ist Bedacht zu nehmen.*

In dieser Formel wird wie in den Niederlanden die bereitgestellte Wärme mit dem Faktor 2/3 gewichtet, dass heißt im Vergleich zum Exergie-Prinzip überbewertet.

2.4. Schweizer Stromversorgungsverordnung

In der Schweizer Stromversorgungsverordnung ist ein Energieeffizienzkriterium als Gerade im Bruttowirkungsgrad-Wärmenutzungsdiagramm definiert [15]. Aus diesem Diagramm ist es möglich folgende Randpunkte zu ermitteln:

$$\eta_{\text{WNG}} (\eta_{\text{el brutto}} = 0) = 65 \%$$

$$\eta_{\text{WNG}} (\eta_{\text{el brutto}} = 25) = 0 \%$$

Formel 16

Aufstellung einer Geradengleichung zwischen diesen zwei Punkten ergibt:

$$\eta_{\text{WNGmin Schweiz}} (\eta_{\text{el brutto}}) = \eta_{\text{WNG}} (\eta_{\text{el brutto}} = 0) +$$

$$\frac{\eta_{\text{WNG}} (\eta_{\text{el brutto}} = 0) - \eta_{\text{WNG}} (\eta_{\text{el brutto}} = 25)}{(\eta_{\text{el brutto}} = 0) - (\eta_{\text{el brutto}} = 25)} \cdot \eta_{\text{el brutto}}$$

Formel 17

Einsetzen der Randpunkte ergibt:

$$\eta_{\text{WNGmin Schweiz}} (\eta_{\text{el brutto}}) = 0,65 + \frac{0,65 - 0}{0 - 25} \cdot \eta_{\text{el brutto}}$$

Formel 18

Umformen für den Faktor 0,97 wie Formel 13 und relative Gewichtung der Wärme berücksichtigen:

$$\eta_{WNGmin\text{ Schweiz}}(\eta_{el\text{ brutto}}) = 0,65 \cdot \frac{0,97}{0,97} + 2,6 \cdot \eta_{el\text{ brutto}} = \frac{0,67 \cdot 0,97 + 2,6 \cdot \eta_{el\text{ brutto}}}{1}$$

Formel 19

Dargestellt wie in Formel 19, lässt sich die Ähnlichkeit zum Europäischen R1-Kriterium erkennen.

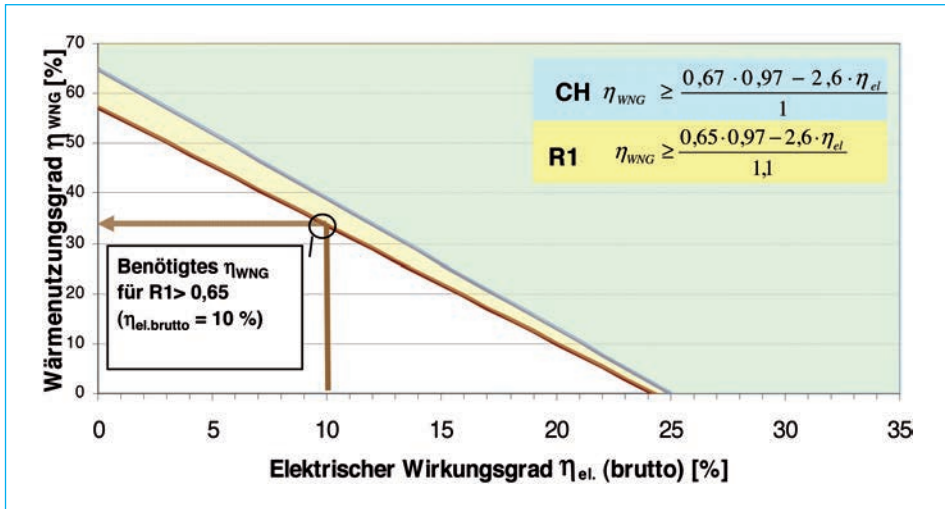


Bild 3: Vergleich der Anforderungen von EU und Schweiz

Die Darstellung in Bild 3 zeigt, dass durch den im Vergleich zum EU-R1 (Formel 10) erhöhten Grenzwert auf 0,67 und die Gewichtung der Wärme mit dem Faktor 1 das Schweizer Kriterium etwas schwerer zu erfüllen ist. Auch dieses Kriterium wird für ein gesamtes Jahr ausgewertet. Allerdings verlieren die Anlagen erst das Anrecht auf höhere Stromvergütung, wenn das Kriterium zwei Jahre in Folge nicht erfüllt wird [15].

2.5. Japanische MOE-Richtlinie

Der *Recycling Society Formation Promotion Plan* wurde in Japan für das Fiskaljahr 2009 vom Umweltministerium (Ministry of Environment) eingeführt [17]. Der Plan beschreibt ein System der Förderung von Investitionen im Bereich der energetischen Nutzung von Abfällen: 50 % der Investitionen für Effizienzsteigerung werden von der Regierung getragen, wenn der Grenzwert einer definierten Energiekennzahl überschritten wird.

$$0,17 \leq \eta_{Japan} = \frac{E_{el\text{ brutto}}}{(Q_{Abfall} + Q_{Zusatzbrennstoff})}$$

Formel 20

Dieser Grenzwert für den elektrischen Brutto-Wirkungsgrad ist abhängig von der Anlagengröße und beträgt zum Beispiel $\eta_{el.,brutto} = 17\%$ für Anlagen mit einer Design-Kapazität von 200 bis 300 Tonnen Abfall pro Tag. Der Investitions-Zuschuss beschränkt sich allerdings auf die Komponenten, die der Energieerzeugung dienen. Die Nutzung von Wärme spielt in Japan keine Rolle und wird auch in die Effizienzberechnung nicht einbezogen.

3. Besonderheiten bei der Anwendung der Kennzahlen

3.1. Systemgrenzen

Beim Vergleich der Wirkungsgrade verschiedener Anlagen ist die Festlegung klarer Bilanzgrenzen von wesentlicher Bedeutung und es kann zwischen räumlichen und zeitlichen Bilanzgrenzen unterschieden werden. Häufig wird die Grenze des Geländes, auf dem eine Anlage steht, als Bilanzgrenze genommen. Der Abfall und gegebenenfalls weitere Brennstoffe stellen die zugeführte Energie dar (Bruttowärme-Input). Strom und Wärme sind der Output. Beim elektrischen Bruttowirkungsgrad wird die abgegebene Stromleistung direkt am Generator gemessen und der Eigenverbrauch wird nicht berücksichtigt.

Falls eine Vorbehandlung des Hausmülls notwendig ist, wird die Bilanzgrenze um die Vorbehandlungseinrichtung erweitert. Ein häufiger Fehler besteht darin, dass zum Beispiel bei einer Ersatzbrennstoff-(EBS-)Verbrennung der Wirkungsgrad auf den Energieinhalt des EBS bezogen wird, statt den Energieinhalt des Hausmülls vor Vorbehandlung zu berücksichtigen.

Beispiel: Der elektrische Wirkungsgrad eines Kohlekraftwerks beträgt 40 % und man kann die theoretische Annahme treffen, dass ohne maßgeblichen Wirkungsgradverlust EBS mitverbrannt wird.

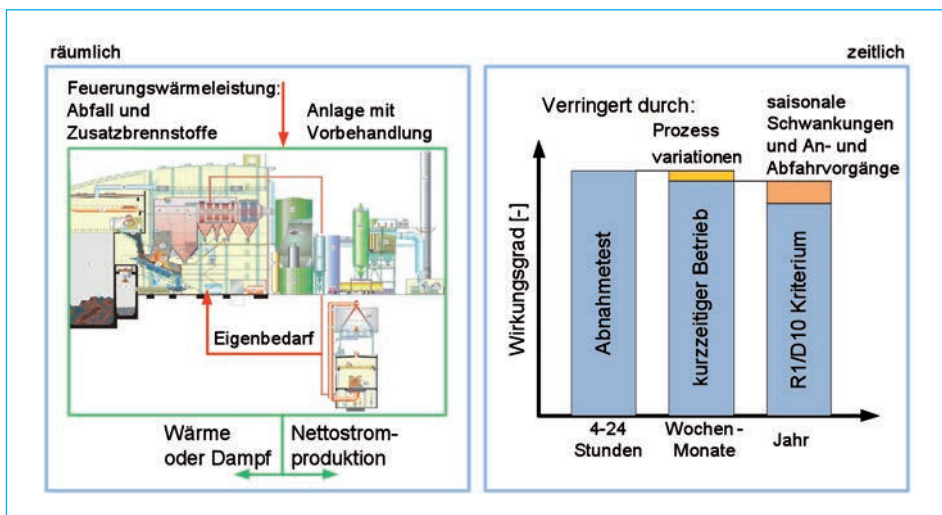


Bild 4: Räumliche und zeitliche Systemgrenzen

Wenn jedoch der Energieinhalt des EBS nach der MBA-Aufbereitung zum Beispiel 35 % des Energieinhalts des ursprünglichen Hausmülls beträgt, wird eine tatsächliche Effizienz, bezogen auf den Hausmüll, von nur $0,35 \times 0,4 = 0,14$ (14 %) erreicht.

Eine weitere Voraussetzung für einen aussagekräftigen Vergleich von Wirkungsgraden stellt die Auswahl einer geeigneten zeitlichen Bilanzgrenze dar. So kann eine Energieeffizienz auf Basis momentaner Messwerte, Tages- und Jahresdurchschnittswerte oder sogar über die gesamte Lebensdauer der Anlage ermittelt werden. Die zeitliche Bilanzgrenze ist deswegen wichtig, weil bei der Bilanzierung über lange Zeiträume Lastschwankungen, An- und Abfahrtssequenzen, Betriebsstörungen und -ausfälle berücksichtigt werden, die den durchschnittlichen Wirkungsgrad verringern.

In der Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure VDI 3460 [18] wird sehr detailliert und systematisch die Wichtigkeit der vernünftigen Definition von Systemgrenzen für die Anwendung von Energiekennzahlen beschrieben.

3.2. Bewertung der Biomasse

Typischer Hausmüll in Industrieländern hat einen Kohlenstoff Gesamtgehalt von etwa 25 %, der in Essens- und Gartenabfällen sowie in Holz, Papier, Karton, Textilien und Kunststoff gebunden ist (Basis: Heizwert von etwa 10 MJ/kg). Der größere Anteil dieses Kohlenstoffs ist biogener Natur und der Rest fossil. Diese Angaben können naturgemäß stark schwanken, abhängig von Regionen, Jahreszeiten, Konsumverhalten und Abfallwirtschaftskonzepten.

Genauer wurde für die USA in der Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure VDI 3460 [18] beschrieben, dass etwa 2/3 des Kohlenstoffs in Hausmüll biogenen Ursprungs ist. Eine andere Studie zeigt für Österreich, dass der Anteil biogener Abfallbestandteile im Hausmüll zwischen 36 % und 53 % schwankt [20].

Die fossilen Bestandteile im Hausmüll bestehen im Wesentlichen aus Kunststoffen, die zum Teil recycelt werden und am Ende Ihres Lebenszyklus deponiert oder zur Erzeugung von Wärme und Strom verwertet werden.

Jedoch sind bei der Bewertung der Abfallbehandlungskonzepte in Bezug auf die globale Erwärmung weitere Faktoren zu berücksichtigen: Unerwünschte Methanemissionen bei der Deponierung, Kompostierung oder mechanisch-biologischen Aufbereitung (MBA) von Hausmüll spielen eine wichtiger Rolle: Methan hat das 25-fache Treibhauspotential von CO_2 . Andererseits erhalten Verfahren zur energetischen Nutzung von Abfällen Gutschriften, wenn sich hiermit fossile Brennstoffe substituieren lassen.

Technisch gesehen kann heutzutage aus Hausmüll mit vergleichbarer Effizienz Energie gewonnen werden wie aus konventioneller Biomasse. Hieraus ergibt sich ein *Biomasse-Paradoxon* (Bild 5). In vielen Ländern wird saubere Biomasse aus der Forst- und Landwirtschaft subventioniert und in Städte/Ballungszentren transportiert, um sie dort für die Energieerzeugung zu verbrennen. Gleichzeitig wird Hausmüll mit seinen Biomasseanteilen aus den Städten aufs Land gebracht,

um deponiert oder nach der MBA/Rotte/Kompostierung trotz verbleibender Schadstoffgehalte in Landschaften eingebracht zu werden. Durch eine konsequente Anwendung von Energiekennzahlen und CO₂-Bilanzen könnte man effektivere Anreizsysteme im Sinne von Klimaschutz einsetzen.

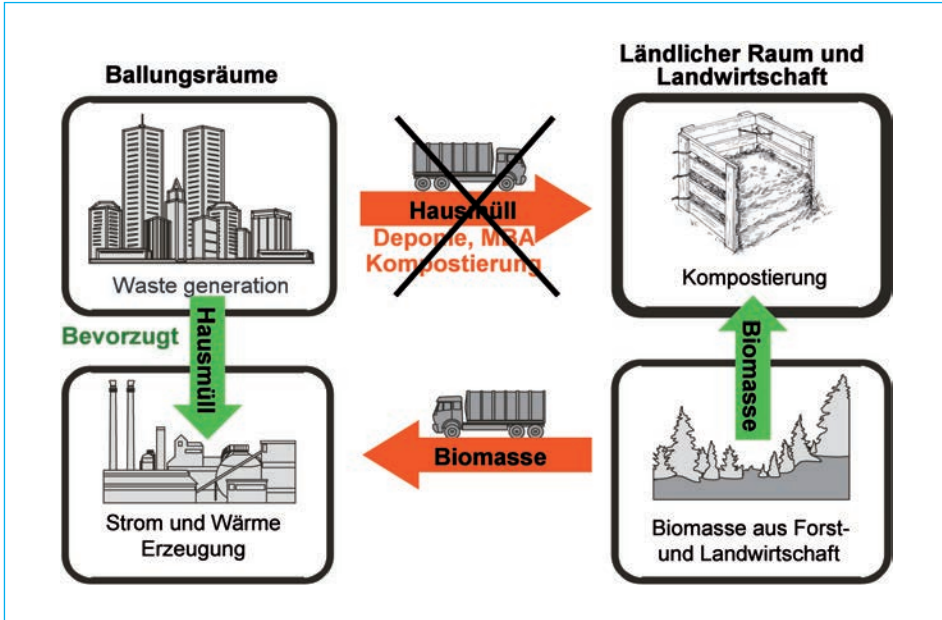


Bild 5: Biomasse Paradoxon

3.3. Stromerzeugung (Rostfeuerung, Kessel und Turbine)

Als Beispiel für die Wirkungsgradberechnung für eine typische moderne Anlage ist in Bild 6 ein Verbrennungssystem mit 21,6 Tonnen Abfalldurchsatz pro Stunde, einem Heizwert von 10 MJ/kg beschrieben. Weitere Randbedingungen sind:

- 40 bar/380 °C Dampfparameter,
- 209 °C Abgastemperatur am Kesselende,
- Luftüberschuss von 1,75 (Abgas, O₂ von 8,4 %, trocken),
- 150 mbar Druck am Kondensator,
- Stromverbrauch der Anlage von 2,1 MW (0,1 MWh/t Abfall).

Der Dampf mit 40 bar/380 °C wird im Dampferzeuger (HD DE) erzeugt und in der Hochdruckturbine (ST 1 bis ST 2) entspannt. Bei Drücken von 10 bar und 4,5 bar findet eine Anzapfung an der Turbine statt, um die Primärluft auf 120 °C (NT Luftvorwärmer) und dann weiter auf 150 °C (HT Luftvorwärmer) zu erhitzen. Das hierbei entstehende Kondensat wird bei einem Druck von 4,5 bar und einer Temperatur von 100 °C mit dem Hauptkondensat aus dem Kondensatvorwärmer vermischt und zum Entgaser gefördert, der mit dem Anzapfdampf

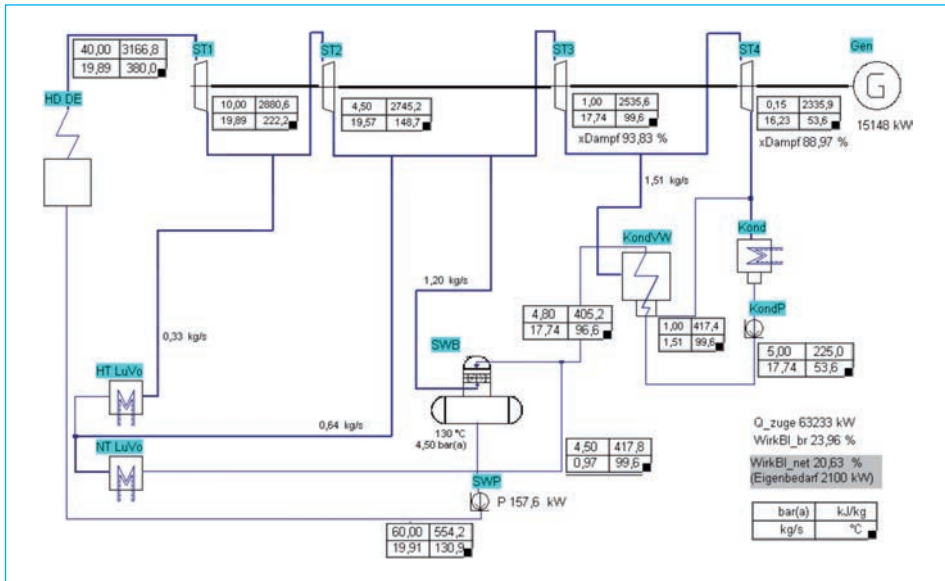


Bild 6: Wasser-Dampf-Kreislauf für einen Durchsatz von 21,6 t Abfall/h, 63 MW Wärme und 15 MW Strom (brutto)

bei einem Druck von 4,5 bar erhitzt wird. In den ND-Stufen der Turbine (ST 3 und ST 4) entspannt sich der Restdampf auf einen durch den Luftkondensator bestimmten Kondensationsdruck von 150 mbar (Nassdampfbereich). Die dargestellte Kondensationsturbine im 15 MW-Bereich ist für einen Abdampfgehalt von etwa 89 % bzw. Wassergehalt von 11 % bei einem entsprechenden Kondensationsdruck von 150 mbar ausgelegt. Bei größeren Kraftwerksturbinen wäre dieser Dampfgehalt schon kritisch niedrig, da verstärkte Tropfenerosion an den Turbinenschaufeln zu erwarten wäre. Ein Wassergehalt bis 12 % ist hingegen für Turbinen in vergleichsweise kleinen Abfallverbrennungsanlagen meistens tolerierbar. Die Kondensatpumpe fördert das Kondensat in den Entgaser, von wo aus es mit der Speisewasserpumpe bei einer Temperatur von etwa 131 °C in den *Economizer* des Kessels gepumpt wird.

Der Gesamtwirkungsgrad einer solchen Anlage beträgt $\eta_{\text{el., net}} = 20,6 \%$ entsprechend der Formel 2 und den Systemgrenzen aus Bild 4. Der entsprechende Brutto-Wirkungsgrad ohne Abzug des Eigenverbrauchs beträgt $\eta_{\text{el., brutto}} = 24 \%$. Hieraus ergibt sich ein R1 von 0,64 entsprechend den Annahmen aus Formel 11. Nicht berücksichtigt sind insbesondere Verluste aus der Verfügbarkeit, der Einsatz von fossilen Energieträgern sowie Gutschriften aus der betrieblichen Nutzung bzw. Verbrauch von Dampf.

Dieser Wirkungsgrad und somit auch indirekt der Nutzen in Bezug auf die CO₂ Bilanz sowie globale Erwärmung kann durch verschiedene Maßnahmen verbessert werden [21]:

- Verringerung des Luftüberschusses,
- Wandüberhitzer bei 60 bar/460 °C,

- Reduzierung des Kondensatdruckes auf 30 mbar,
- Erhöhung der Dampfparameter auf 73 bar/480 °C,
- Zwischenüberhitzung (Amsterdam mit Satttdampf; Rüdersdorf im Abgas),
- externe Überhitzung (in Bilbao und Mainz in GuD Kraftwerken).

In Bild 7 werden der elektrische Brutto- und Nettowirkungsgrad auf Varianten der energetischen Nutzung von Abfällen angewendet [22]. Die typische MVA bezieht sich auf die Daten aus Bild 6. Die optimierte Anlage bezieht sich auf Dampfparameter von 74 bar/480 °C mit einem Abgas O_2 von 6 % (trocken) und 135 °C Abgastemperatur am Kesselende. In dem Diagramm wird außerdem deutlich, dass in dem Beispiel ein Wärmenutzungsgrad von 30 % (typisch für Deutschland) zu einer Reduzierung des elektrischen Wirkungsgrades von 4 % (-Punkten) führt.

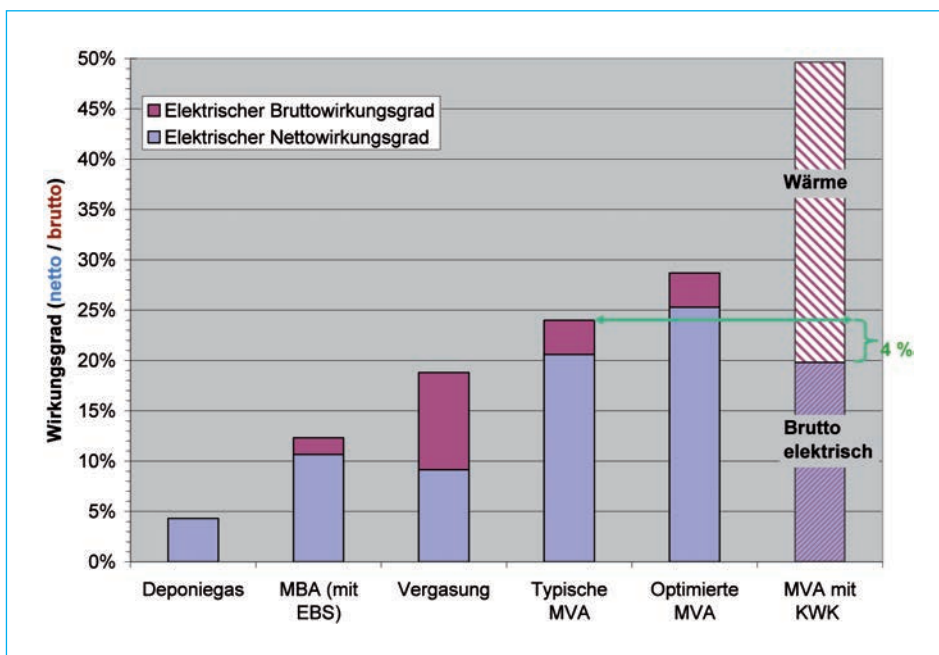


Bild 7: Elektrischer Brutto- und Nettowirkungsgrad angewendet auf Varianten der energetischen Nutzung von Abfällen

3.4. Kraft-Wärme-Kopplung

Eine weitere Möglichkeit, die CO_2 -Bilanz zu verbessern, bietet die Kraft-Wärme-Kopplung. In der Regel ist eine MVA über einen Kondensatwärmetauscher an ein Fernwärmenetz angeschlossen. Die im Jahresdurchschnitt abgegebene Wärmeleistung der Anlagen in Deutschland beträgt 30 %, wobei jedoch technisch durchaus 60 % möglich sind.

In dem Beispiel in Bild 8 ist der Kondensationswärmetauscher an die 4,5 bar Anzapfung angeschlossen und das entstehende Kondensat wird in den Speisewasserbehälter abgeleitet. Im Wärmetauscher wird Heißwasser von 70 °C auf 130 °C aufgeheizt. Ein alternatives Konzept sieht Dampf mit einem Druck von 1 bar und einer daraus resultierenden Einspeisetemperatur von 95 °C vor (rechtes Schema in Bild 8).

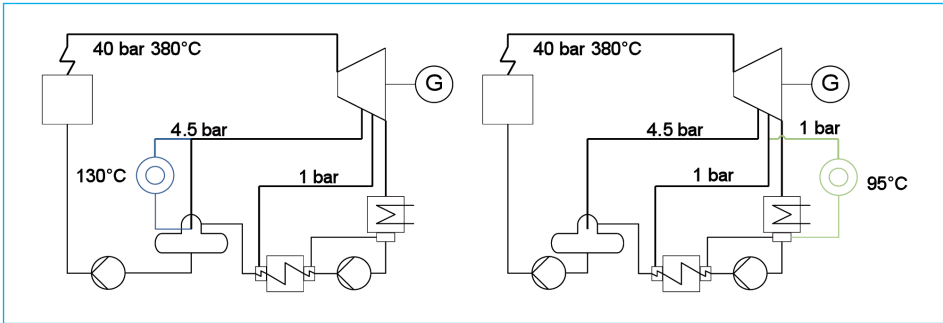


Bild 8: Beispiel für Kraft-Wärme Kopplung

Ein Beispiel für eine MVA mit noch weitergehender Nutzung von Wärme wurde in Göteborg realisiert. Diese Anlage ist der bevorzugte Wärmeerzeugungsbetrieb in einem großen Heiznetz. Zusätzlich kann durch über in der Stadt verteilte Absorptionskältemaschinen auch im Sommer Wärme genutzt werden, was zu einer guten Auslastung der Anlage über das gesamte Jahr führt.

In Göteborg hängt die Vor- und Rücklauftemperatur des Heiznetzes von der Außentemperatur ab. Die Vorlauftemperatur variiert zwischen 75 und 110 °C, während die Rücklauftemperatur zwischen 40 und 55 °C schwankt. Der Jahresdurchschnitt liegt bei 45 und 80 °C.

Bild 9 zeigt vereinfacht die vier Stufen, in denen Wärme ausgekoppelt wird. Durch die geringe Rücklauftemperatur kann in einer ersten Stufe Wärme aus dem Kondensatwäscher direkt genutzt werden. Die zweite Stufe wird von mehreren Absorptionswärmepumpen gebildet, welche die Niedertemperaturwärme des Kondensatwäschers als Wärmequelle nutzen und mit 5 bar Dampf betrieben werden. Die nächste Stufe nutzt Überschusswärme aus dem zweiten Economizer, die je nach Gegendruck im Hauptkondensator zur Verfügung steht. Die vierte Stufe wird vom Hauptkondensator gebildet, der im Gegendruckbetrieb arbeitet und das Wärmeträgermedium auf Vorlauftemperatur bringt. Vor dem Hauptkondensator besteht noch die Möglichkeit, Wärme über einen Kühlturm abzuführen, um bei unzureichendem Wärmebedarf die Turbine ausreichend zu kühlen [23]. Dreißig Prozent der Wärme kommen in Göteborg aus dem Abgas außerhalb des eigentlichen Dampfkessels. Dies ermöglicht eine höhere Wärmeauskopplung bei gleicher Stromproduktion und senkt somit die Stromverlustkennzahl.

Der elektrische Bruttowirkungsgrad und der Wärmenutzungsgrad werden in dem Diagramm in Bild 10 ins Verhältnis gesetzt. Das Diagramm wurde basierend auf der Darstellung der Schweizer Anforderungen zum Wirkungsgrad erstellt.

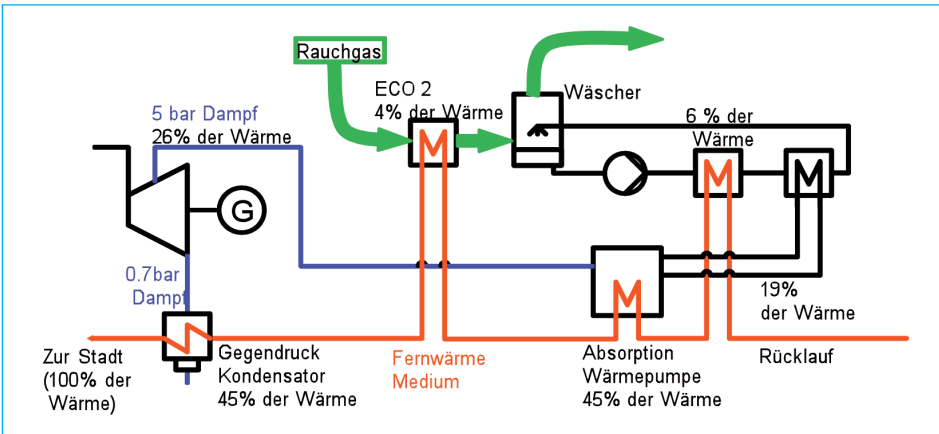


Bild 9: Optimierte Nutzung von Wärme in Göteborg

Dabei wurde die Darstellung um eine Gerade ergänzt, welche die Mindestanforderung für den energetischen Verwertungsstatus neuer Anlagen in Europa kennzeichnet ($R1 > 0,65$ entsprechend [9]). Zunehmende $R1$ -Werte werden dargestellt durch die Verschiebung der Gerade nach oben rechts.

Die Steigung der Geraden für die 40 bar/380 °C Anlagenkonzepte wird durch die Stromverlustkennzahl bestimmt (Formel 6). Der größere Stromverlust der Anlage mit einer Einspeisetemperatur von 130 °C gegenüber der Anlage mit 95 °C ist deutlich sichtbar.

Die Grenzen für den elektrischen Wirkungsgrad $\eta_{el., netto}$ und den Wärmenutzungsgrad η_{WNG} , die erforderlich sind, um bei der energetischen Nutzung von Abfällen eine positive CO_2 -Bilanz zu haben, sind ebenfalls dargestellt [4, 25].

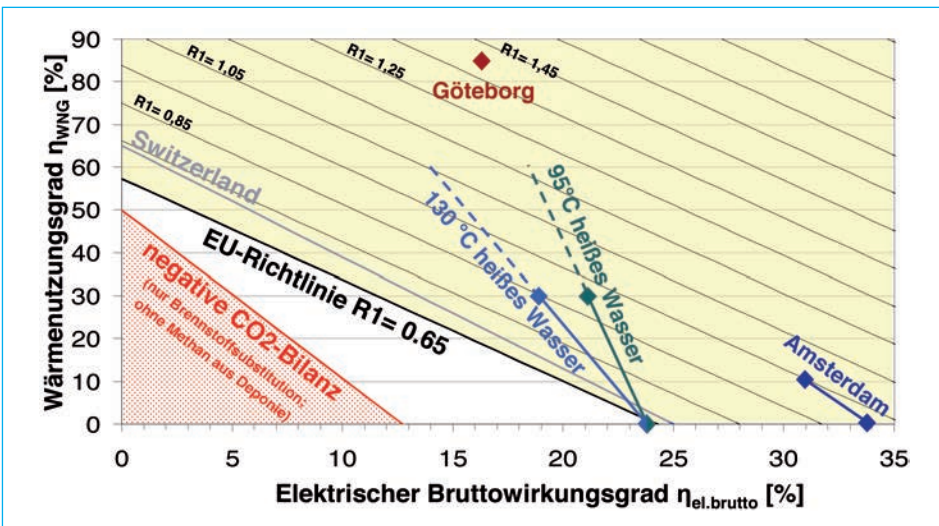


Bild 10: Elektrischer Wirkungsgrad und Wärmenutzungsgrad

In Bild 10 sind insbesondere nicht berücksichtigt die Verluste aus der Verfügbarkeit (über das Jahr), dem Einsatz von fossilen Energieträgern sowie Gutschriften aus der betrieblichen Nutzung bzw. dem Verbrauch von Dampf.

3.5. Vergleich der relativen Wertigkeit von Strom und Wärme

Für die Bestimmung der Energieeffizienz ist ausschlaggebend, welche Kennzahl gewählt wird und in diesem Zusammenhang vor allem, wie sich das Verhältnis von Strom- und Wärmeauskopplung darstellt. De facto reduziert eine weit reichende Wärmeauskopplung den elektrischen Wirkungsgrad, denn ein Teil des erzeugten Dampfes wird für die Wärmeauskopplung verwendet und steht somit nicht mehr der Turbine zur Stromerzeugung zur Verfügung. In der Praxis der technischen Umsetzung sind zahlreiche Varianten der kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung gebräuchlich.

In Bild 11 werden verschiedene Kennzahlen verglichen, die eine gewichtete Summierung von elektrischem Strom und Wärmenutzung beinhalten. Um einen Vergleich der Kennzahlen zu erleichtern, wird für den Strom in Bild 11 ein Faktor von 1 festgelegt. Der Gesamtenergienutzungsgrad als thermodynamische Kennzahl beinhaltet keinerlei Gewichtung zwischen Strom und Wärme und ist als Bewertungskriterium in der Praxis ungeeignet. Außerdem wird deutlich, dass auch die politischen Kennzahlen StromVV (CH), R1 (EU), ÖkostromG (AT) und SDE (NL) jeweils deutlich und zunehmend die Erzeugung von Wärme gegenüber einer Exergiebetrachtung überbewerten. Eine weitere Schwäche der vorhandenen politischen Kennzahlen ist, dass das Temperaturniveau der Wärmenutzung nicht berücksichtigt wird.

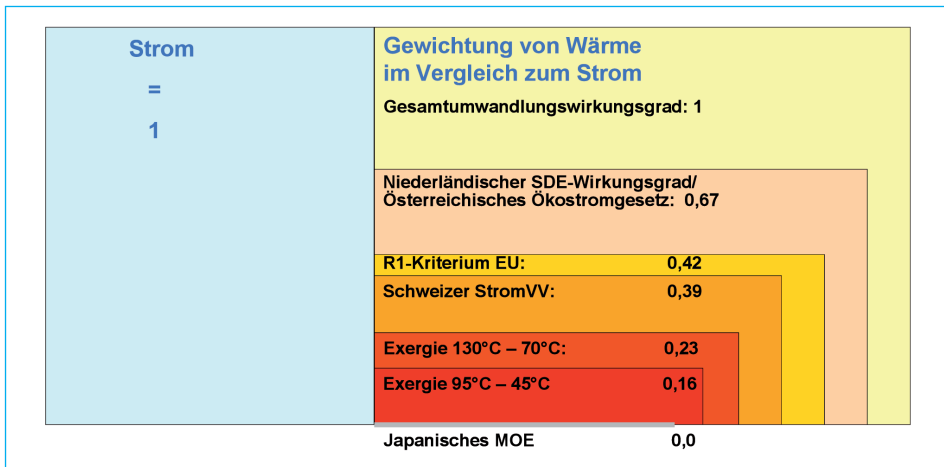


Bild 11: Relativer Vergleich der Gewichtung der Wärme gegenüber Strom (Strom = 1) bei der Anwendung unterschiedlicher Kennzahlen

Quelle: Minister van Economische Zaken: Regeling van de Minister van Economische Zaken van 8 december 2003, nr. WJZ 3073206, tot vaststelling van uitvoeringregels voor meting en uitgifte van garanties van oorsprong ten behoeve van duurzame elektriciteit (Regeling garanties van oorsprong voor duurzame elektriciteit), Den Haag, 2003

Dies kann dazu führen, dass mit den Kennzahlen falsche Anreize gesetzt werden, zum Beispiel das Beheizen von Gewächshäusern oder Fischteichen zu Lasten einer effizienten Stromerzeugung. Trotzdem ist zu erwarten, dass die beschriebenen politischen Kennzahlen in den meisten Fällen die richtigen Anreize geben und dabei den Vorteil haben, dass sie wesentlich einfacher anzuwenden und zu verstehen sind als die Methodik der Exergieeffizienz.

3.6. Steigerung der Stromproduktion durch solarthermische Komponenten

Die Integration von Solarenergie in den Dampfkreislauf einer Abfallverbrennungsanlage kann Energieproduktion und Wirtschaftlichkeit einer MVA verbessern (Nutzungsgrad von bis zu 1.000 kWh/t Abfall). Entscheidend dafür sind jedoch die Art der Integration und die richtige Solarfeldauslegung. Das Grundprinzip dieser Kopplung oder Hybridisierung ist in Spliethoff et al. [26] dargestellt. Weitere Anreize für diese Art der Kombination sind, dass die Stromproduktion bei Nacht und Bewölkung durch die Abfallverbrennung aufrechterhalten werden kann (keine Abkühlung oder Notwendigkeit von Wärmespeichern). Außerdem ergeben sich wirtschaftlich Vorteile durch Scale-up Effekte, weil die Kombi-Anlagen entsprechend mit größeren Komponenten im Wasser-Dampf Kreislauf realisiert werden können. Als Standorte kommen Länder mit einer jährlichen Direktnormal-Strahlung (DNI) von über 2000 kWh/a in Frage. Gute Voraussetzungen für diese Kombination herrschen in Kalifornien, im mittleren Osten, Nordafrika und Südeuropa.

Hier soll nicht die Sinnhaftigkeit oder das Marktpotential dieser Kopplung weiter erläutert werden, sondern nur die Wichtigkeit der richtigen Auswahl von Energiekennzahlen anhand dieses recht anschaulichen Beispiels verdeutlicht werden. Eine der wesentlichen Voraussetzungen ist hierbei, dass bei maximaler Sonneneinstrahlung 50 % der Energiemenge aus dem Solarteil kommt.

Als Basis für die Wirkungsgradbetrachtung wird das folgende Szenario herangezogen. Für weitere Informationen zu den Szenarien und dem Thema siehe Spliethoff et al. [26] oder www.solarwte.org.

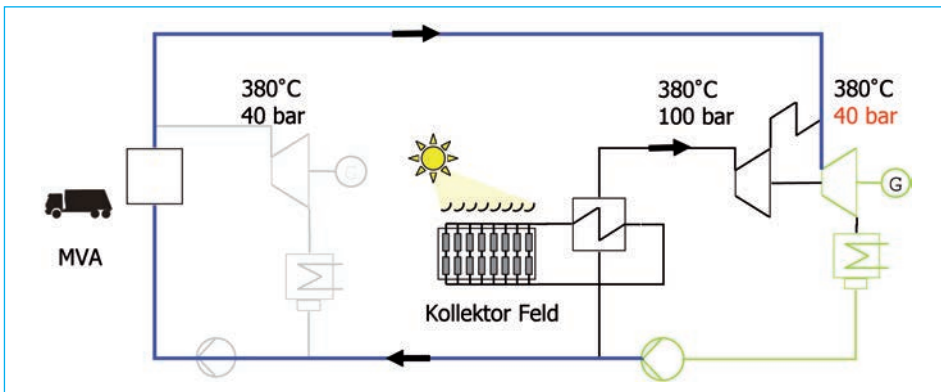


Bild 12: Prinzipbild der Steigerung von Energieeffizienz einer typischen MVA mit Dampfparametern von 40 bar/380 °C durch solarthermische Komponenten

Die Bilanzierung zum Effizienzvergleich mit konventionellen Abfallverbrennungsanlagen erfordert eine besondere Betrachtung der Energiekennzahlen. Am besten geeignet und relativ klar in der Anwendung ist der elektrische Nutzungsgrad. Er bezieht die gesamte von einer Anlage produzierte Strommenge auf die verbrannte Menge Abfall. Der Heizwert wird in den hier dargestellten Beispielen mit 10 MJ/t Abfall angenommen. In dem Beispiel einer typischen MVA kann der Nutzungsgrad durch das beschriebene Szenario um über 20 % gesteigert werden (von 768 auf 935 kWh/t Abfall).

$$\varphi = \frac{E_p}{m_{\text{Abfall}}} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{t}} \right] \quad \text{Formel 21}$$

Die Anwendung des elektrischen Wirkungsgrades als Energiekennzahl ist weniger eindeutig. Man könnte als *Aufwand* die Energie der Sonnenstrahlung nehmen, was dann allerdings zu sehr geringen Wirkungsgraden führen würde. Außerdem wird die Sonnenenergie bei der Bildung des Brennstoffes durch Photosynthese, auch bei der Verwendung von fossilen Brennstoffen, bei der Wirkungsgradberechnung nicht als Aufwand gezählt. Dies würde zu absurd niedrigen Wirkungsgraden bei fossilen Kraftwerken führen. In der folgenden Formel 22 und Bild 13 wird deswegen – relativ willkürlich definiert – der solar produzierte Dampf und die Energie aus dem Abfall als Aufwand zusammengezählt.

$$\eta_{\text{elektrisch}} = \frac{P_{\text{elektrisch}}}{\dot{Q}_{\text{Abfall}} + \dot{Q}_{\text{Dampf solar}}} \quad \text{Formel 22}$$

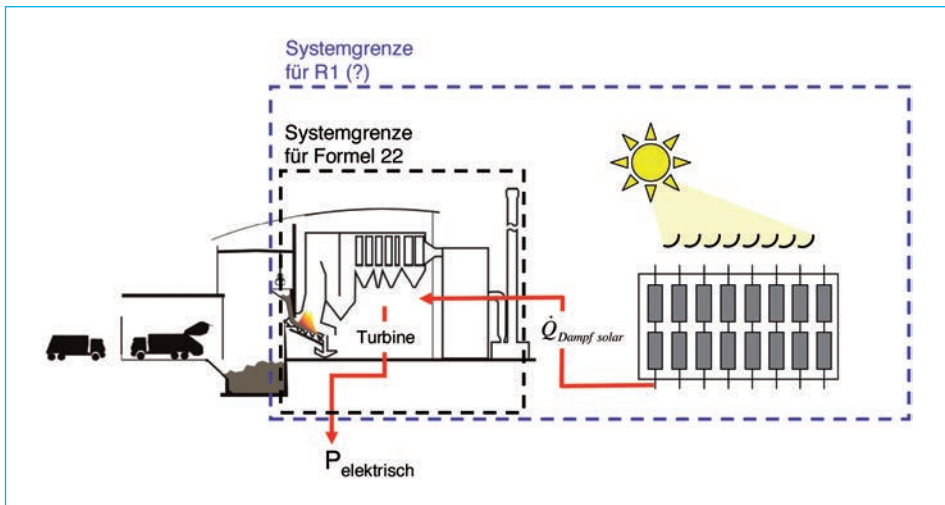


Bild 13: Systemgrenze für den *elektrischen Wirkungsgrad* entsprechend Formel 22

Relevant für die umweltpolitische und ökonomische Bewertung der Szenarien ist die R1 Berechnung aus der EU-Abfallrahmenrichtlinie [9].

$$R1 = \frac{E_p - E_f - E_i \text{ (fossilen Ursprung?)}}{0,97 \cdot (E_w + E_f)}$$

Formel 23

In der R1 Berechnung werden fossiler Brennstoff E_f und importierte Energie bzw. Wärmeströme als E_i von der produzierten Energie E_p abgezogen. Unklar ist entsprechend [9], ob Wärme oder Dampf aus solarthermischen Quellen auch als E_i abgezogen werden müssen. Dies erscheint wenig sinnvoll im Hinblick auf die Zielsetzung von Effizienzsteigerung und CO_2 -Minimierung. Die Daten aus den Beispielrechnungen in Bild 14 zeigen, dass bei Abzug des solaren Inputs (als E_i wie bei fossil produziertem Dampf), der R1 trotz deutlich erhöhtem Nutzungsgrad von über 20 % nur eine marginale Erhöhung von 0,74 auf 0,75 zur Folge hätte. Realistischer erscheint die Berechnung ohne Berücksichtigung des solarthermischen Dampfes als E_i (Systemgrenze entsprechend Bild 13), die eine deutliche R1 Steigerung der MVA entsprechend der verringerten spezifischen CO_2 -Emissionen ausdrückt und einen Anreiz für Effizienzsteigerung bei MVA's in sonnenreichen Regionen bedeuten würde.

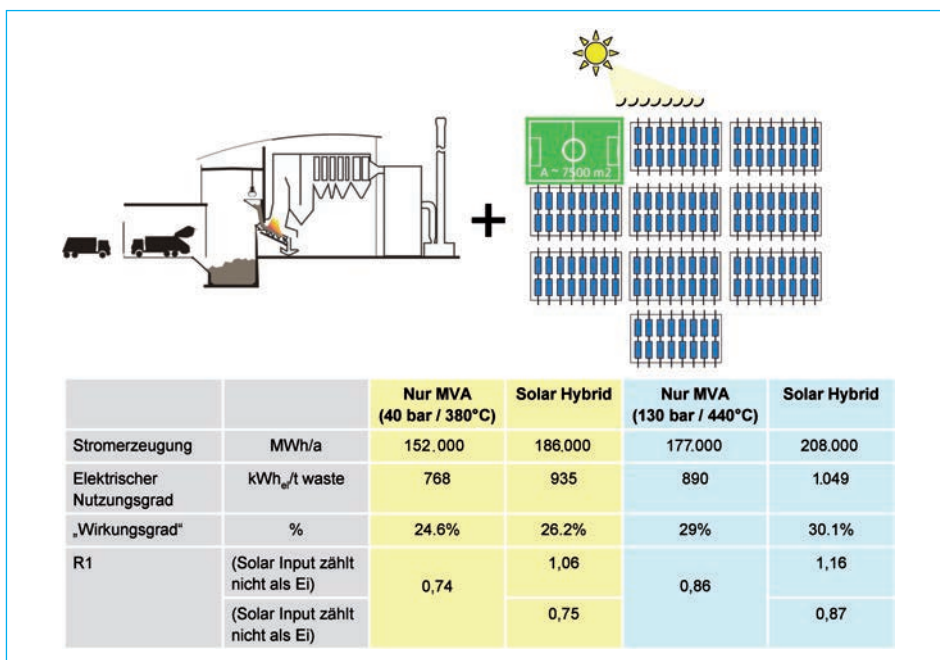


Bild 14: Nutzungsgrad, Wirkungsgrad und R1 am Beispiel einer Kombination der Abfallverbrennung mit solarthermischer Stromerzeugung

4. Schlussfolgerungen

Öko- und CO_2 -Bilanzen von Abfallwirtschaftssystemen zeigen, dass die effiziente energetische Nutzung von Hausmüll entscheidend ist, um positive Effekte zur Minimierung der globalen Erwärmung zu erhalten [27]. Damit ein einheitlicher

Bewertungsmaßstab angelegt werden kann, müssen geeignete Bilanzgrenzen verwendet werden und Stromerzeugung sowie Wärmenutzung berücksichtigt werden. Das neue europäische R1-Kriterium [9] ist gut geeignet um die Entwicklung und Realisierung optimierter Verfahren/Systeme mit erhöhter Energieeffizienz zu ermöglichen. Dies wird wiederum die CO₂-Bilanz der Abfallwirtschaft in Europa positiv beeinflussen. Klärungsbedarf besteht allerdings noch bei der *exotischen* Fragestellung der Energieeffizienzsteigerung mit solarthermischen Komponenten. Vielversprechende energieeffiziente Technologien sind insbesondere Rostfeuerungen in Kombination mit effizienten Kesseln und Turbinen. Entwicklungspotential besteht in Bezug auf die Erhöhung der Dampfparameter, die Reduzierung des Eigenverbrauchs sowie effiziente Kraft-Wärme-Kopplung. Gute Beispiele für eine effiziente Stromgewinnung sind die Anlagen in Brescia [28] und Amsterdam [29]. Beispiele für besonders hohe Wärmenutzungsgrade sind die Anlagen in Malmö und Göteborg. Das Potential zur Reduzierung von Treibhausgasen kann aber in der Abfallwirtschaft nur ausgeschöpft werden, wenn die Deponierung und MBA durch Deponierungssteuern begrenzt werden oder Prämien auf den aus Abfällen erzeugten Strom und Wärme bezahlt werden. Für die Entwicklung vernünftiger gesetzlicher Steuermechanismen ist es notwendig eine möglichst genaues Bild der Energiekennzahlen zu haben.

5. Literatur

- [1] Wandschneider, J.: Optimierungsmaßnahmen zur Steigerung des Wirkungsgrades. In: Müll und Abfall (2007), Nr. 5, S. 215-221
- [2] EN 12952-16: Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten – Teil 16: Anforderungen an Rost- und Wirbelschichtfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe für den Kessel. Europäische Norm 12952-16, 2002
- [3] Gohlke, O.; Neukirchen, B.; Wiesner, J.: Werkzeuge zur Bewertung von Abfallbehandlungsverfahren – Methoden und Ergebnisse. Verein Deutscher Ingenieure e.V.; VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (VDI-GVC), Düsseldorf, 2006 (<http://www.ask-eu.de/default.asp?Menue=115&Experte=235>)
- [4] Van Berlo, M.; de Waart, H.: Unleashing the power in waste Comparison of Greenhouse gas and other Performance Indicators for Waste-to-Energy concepts and Landfilling. Proceedings of NAWTEC 16th Annual North American Waste-to-Energy Conference, Philadelphia, NAWTEC16- 1937, 2008
- [5] VDI 3925 Werkzeuge zur Bewertung von Abfallbehandlungsverfahren, Neue Richtlinie, Entwurf wird erarbeitet, Erscheinungsdatum voraussichtlich 2011 (<http://www.vdi.de/44176.0.html>)
- [6] FDBR Arbeitskreis Abfallverbrennung: Abnahmeversuche an Abfallverbrennungsanlagen mit Rostfeuerungen, Düsseldorf, 2000
- [7] VDI-Richtlinie 3986:Bestimmung von Wirkungsgraden konventioneller Kraftwerke, 2000
- [8] Cornelissen, R. L.: Thermodynamics and sustainable development: The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility. Dissertation, University of Twente, Enschede, 1997
- [9] Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19 November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien (Abfallrahmenrichtlinie, R1-Formel in einer Fußnote von Anhang II) EU-Kommission, Brüssel, 2008
- [10] Murer, M. J.; Spliethoff, H.; van Berlo, M. A. J.; de Waal, C. M. W.; Gohlke, O.: Comparison of energy efficiency indicators for energy-from-waste plants. In: SARDINIA 2009, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium, 5-9 October, S. Margherita di Pula (Cagliari), Sardinia , 2009

- [11] Minister van Economische Zaken: Regeling van de Minister van Economische Zaken van 8 december 2003, nr. WJZ 3073206, tot vaststelling van uitvoeringregels voor meting en uitgifte van garanties van oorsprong ten behoeve van duurzame elektriciteit (Regeling garanties van oorsprong voor duurzame elektriciteit), Den Haag, 2003
- [12] Grosso, M.; Motta, A.; Rigamonti, L.: Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive. *Waste management* 30, 2010, S. 128-1243
- [13] SenterNovem: Programma Stimuleren Duurzame Energieproductie (SDE), Incentive scheme for sustainable energy production (Programme für Anreize zur nachhaltigen Energieerzeugung), www.senternovem.nl/sde, November 2008, Niederlande
- [14] Lensink, S. M.; Pfeiffer, E. A. et.al.: Conceptadvies basisbedragen 2010 voor elektriciteit en groen gas in het kader van de SDE-regeling, ECN-E—09-049, 2010. <http://www.ecn.nl/publicaties/default.aspx?nr=ECN-E--09-049>
- [15] Bundesamt für Energie der Schweiz: Stromversorgungsverordnung, 2008, S. 37
- [16] Ökostromgesetz-Novelle: 105. Bundesgesetz, mit dem das Ökostromgesetz, das Elektrizitätswirtschafts- und Organisationsgesetz und das Energie-Regulierungsbehördengesetz geändert werden, Wien, 12.-14. Juni 2006
- [17] Ministry of the Environment Japan-MOE: Manual for high efficiency power generation, 2009, S. 5-6
- [18] VDI 3460, Teil 2 Emissionskontrolle – Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung, 2007
- [19] U.S. Department of Energy: Methodology for Allocating Municipal Solid Waste to Biogenic and Non-Biogenic Energy, Energy Information Administration, Office of Coal, Nuclear, Electric and Alternate Fuels, Mai 2007(www.eia.doe.gov/cneaf/solar.renewables/page/mswaste/msw_report.html)
- [20] Fellner, J.; Cencic, O.; Rechberger, H.: A new method to determine the ratio of electricity production from fossil and biogenic sources in waste-to-energy plants; *Environmental Science and Technology*, 41, Heft 7, 2007, S. 2579-2586
- [21] Gohlke, O.; Martin, J.: Drivers for Innovation in Waste-to-Energy Technology, *Waste Management and Research* 25, 2007, pp. 1-6
- [22] Gohlke, O.: Verbesserungspotentiale der Energieeffizienz bei der Nutzung von Energie aus Abfall. In: Bilitewsky, B.; Urban, A. I.; Faulstich, M. (Hrsg.): 13. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung. Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Kassel University Press, Kassel, 2008, S. 135-149
- [23] Edberg B.: Energioprojekt AB Persönliche Korrespondenz, Göteborg, 2008
- [24] Gohlke, O.: Efficiency of energy recovery from municipal solid waste and the resultant effect on the GHG balance, *Waste and Climate Copenhagen*, 2009
- [25] Gohlke, O.: Efficiency of energy recovery from municipal solid waste and the resultant effect on the GHG balance und *Waste Management & Research* 27/9, 2009, S. 894-906
- [26] Spliethoff, H.; Gohlke, O.; Murer, M. J.; Alonso-Herranz, E.; Kaeding, N.: Combining Energy from Waste and Concentrated Solar Power, ISWA World Congress, Hamburg, 2010
- [27] Christensen, T. H.; Bhandar, G.; Lindvall, H.; Larsen, A. W.; Fruergaard, T.; Damgaard, A.; Manfredi, S.; Boldrin, A.; Riber, C.; Hauschild, M.: Experience with the use of LCA-modelling (EASEWASTE) in waste management. *Waste Management and Research* 25, 2007, S. 257-262
- [28] Bonomo, A.: Combining energy efficiency renewable energy, environmental protection, cost efficiency. First operational results from the Brescia WtE plant. ISWA 4th International Management Conference, Amsterdam, 1998
- [29] Van Berlo M.: Waste is innovation – Amsterdam’s high efficiency waste fired power plant, ISWA World Congress, Copenhagen, 2006s

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Energie aus Abfall – Band 8

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Michael Beckmann.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011

ISBN 978-3-935317-60-3

ISBN 978-3-935317-60-3 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky

Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2011

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,

Dipl.-Ing. Ernst Thomé, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc. und Dr.-Ing. Stephanie Thiel

Erfassung und Layout: Janin Burbott, Dipl.-Kffr. Elke Czaplewski, Petra Dittmann,

Martina Ringgenberg, Ginette Teske

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.