

Bewertung der Energieeffizienz in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung¹⁾

Stellungnahme des Ausschusses VDI 3460 der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL

- 15.11.2006 -

1	Zusammenfassung	119
2	Veranlassung und Zielstellung	120
3	Prinzipielle Erörterung des Vorschlages im Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie	121
4	Gegenüberstellung des Vorschlages im Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie mit der in den Richtlinien VDI 3460 Blatt 2 und VDI 4661 vorgestellten Methode	125
4.1	Prinzipielles Beispiel zur Problematik der Äquivalenzzwerte	125
4.2	Beispiel aus der praktischen Anwendung	127
5	Literatur	132

1 Zusammenfassung

Die Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN hat im Mai 2006 die Richtlinie VDI 3460 Blatt 2 „Emissionsminderung – Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung“ im Entwurf vorgelegt. In diesem Richtlinienentwurf wird dargelegt, wie bei der Ermittlung der Energieeffizienz in thermischen Abfallbehandlungsanlagen methodisch vorzugehen ist. Die Einbeziehung der Berechnungsgleichung in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie wurde als nicht zweckmäßig erachtet. Wesentliche Kritikpunkte an der in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie dargestellten Berechnungsgleichung sind:

1. In der Berechnungsgleichung in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie steht die als Zusatzenergie eingetragene Energie E_f als Aufwand im Nenner der Gleichung. Sie stellt aber keinen Aufwand für den zugehörig zu ermittelnden Nutzen (Netto-Energie) dar. Die Gleichung entspricht somit formal nicht der Definition eines Wirkungsgrades.

¹⁾ Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann, Bauhaus-Universität Weimar; Prof. Dr.-Ing. Reinhard Scholz, Technische Universität Clausthal; abgestimmt mit Prof. Dr.-Ing. Helmut Seifert, Forschungszentrum Karlsruhe und Dr.-Ing. Adolf Nottrodt, Hamburg – im Auftrag des Ausschusses VDI 3460 der Kommission Reinhaltung der Luft

2. Die Berechnungsgleichung in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie berücksichtigt Verluste „aufgrund von Rost- und Kesselasche sowie von Strahlung“ mit einem Faktor kleiner 1 (0,97) im Nenner. Das führt rechnerisch zu einem verminderten Aufwand. Mit zunehmenden Verlusten ergibt sich damit eine zunehmend bessere Energieeffizienz der Anlage.
3. Für die Ermittlung der Energieinhalte unterschiedlicher Energiearten werden in der Berechnungsgleichung in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie Äquivalenzfaktoren verwendet, was aus thermodynamischer Sicht nicht zulässig ist. Äquivalenzfaktoren besitzen die Eigenschaft von Mittelwerten und sind daher nur für Überschlagsrechnungen, jedoch nicht für die Bilanzierung konkreter Anlagen geeignet.
4. In der Berechnungsgleichung in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie ist es für die Abgrenzung zwischen E_f und E_i erforderlich, Zusatzbrennstoffe „die zur Erzeugung von Dampf beitragen“ von solchen Zusatzbrennstoffen zu unterscheiden, bei denen dies nicht der Fall ist. Diese Unterscheidung ist für die Ermittlung der Energieeffizienz irrelevant.
5. In der praktischen Anwendung der Berechnungsgleichung in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie kommt es zu Schwierigkeiten und u.U. auch zu erheblichen Fehlern, da die Zuordnung der einzelnen Energieströme (E_p , E_i , Brutto-, Nettoerzeugung, Eigenbedarf usw.) methodisch nicht vorgegeben ist (z.B. als schlüssiges Bilanzierungsschema mit den zu bewertenden Bilanzkreisen und allen an diesen Bilanzkreisen ein- und austretenden Energieströmen).

Insgesamt entspricht der Vorschlag für die Ermittlung der Energieeffizienz nach dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie damit nicht einer als richtig anerkannten, auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und praktischen Erfahrungen beruhenden Darstellung des Standes der Technik und kann deshalb auch keinen Maßstab für einwandfreies technisches Vorgehen bilden, so wie dies für VDI-Richtlinien gefordert wird.

2 Veranlassung und Zielstellung

Die Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN hat im Mai 2006 die Richtlinie VDI 3460 Blatt 2 „Emissionsminderung – Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung“ im Entwurf vorgelegt [1]. Im Rahmen des Einspruchverfahrens wurde in einer Bund/Länder-Stellungnahme [2] darum gebeten,

- neben der in der Richtlinie VDI 3460 Blatt 2 vorgestellten Methode für die Bewertung der Energieeffizienz in Abfallverbrennungsanlagen die in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie vom 21.12.2005 [3] vorgeschlagene Berechnungsgleichung zur Abgrenzung von Verwertungsverfahren und Beseitigungsverfahren zu berücksichtigen und möglichst
- einen Abgleich zwischen den vorgenannten Methoden herzustellen.

Bereits während der Erarbeitung des vorliegenden Entwurfes für die Richtlinie VDI 3460 Blatt 2 wurde die in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie aufgeführte Berechnungsgleichung ausführlich diskutiert. Die Einbeziehung dieser Berechnungsgleichung wurde als nicht zweckmäßig erachtet, da keine Konformität mit den Anforderungen an VDI-Richtlinien besteht. VDI-Richtlinien verfolgen gemäß VDI 1000 [4] u.a. die Zielstellungen:

- Erstellung von richtungweisenden Arbeitsunterlagen und Entscheidungshilfen,
- Beschreibung des Standes der Technik laufender und zukünftiger Entwicklungen und
- Behandlung technisch-wissenschaftlicher und technisch-wirtschaftlicher Fragestellungen.

Dabei gilt als eine anerkannte Regel der Technik nach der VDI 1000 eine als richtig anerkannte, auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und praktischen Erfahrungen beruhende Darstellung des Standes der Technik. VDI-Richtlinien sollten dabei fachgerecht sein, allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen und einen Maßstab für einwandfreies technisches Vorgehen bilden [4]. Bei der Berechnungsgleichung im Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie handelt es sich

- zunächst um einen Vorschlag² und damit
- formal nicht um einen gesicherten Stand der Technik.
- Darüber hinaus erfüllt die Berechnungsgleichung nicht den Anspruch einer als richtig anerkannten, auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und praktischen Erfahrungen beruhenden Darstellung des Standes der Technik. Hierauf sei im Folgenden zunächst prinzipiell und anschließend anhand eines praktischen Beispiels näher eingegangen.

3 Prinzipielle Erörterung des Vorschlages im Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie

Für die energetische Bewertung einer thermischen Abfallbehandlungsanlage ist es zweckmäßig, eine Massen- und Energiebilanz für diese Anlage³ durchzuführen und hierfür zunächst einen Bilanzkreis um die Anlage zu zeichnen und an diesem alle ein- und austretenden Ströme anzutragen. Abb. 3-1 zeigt eine prinzipielle Darstellung eines solchen Bilanzschemas für die Energiebilanz. Ausgehend von dieser prinzipiellen Darstellung wird im Folgenden gezeigt, wie formal

² Der Vorschlag wurde in Anlehnung an [5] übernommen. Dort wurde die Berechnungsgleichung in den letzten Jahren mehrfach geändert. Weitere Änderungen in dem aktuellen Vorschlag für eine Abfallrahmenrichtlinie können nicht ausgeschlossen werden.

³ Bilanziert werden konkrete Anlagen. In Abhängigkeit von dem Bilanzierungsergebnis entscheidet sich, ob für den vorliegenden Fall eine Einstufung im Sinne [3] als Verwertungsverfahren vorgenommen werden kann.

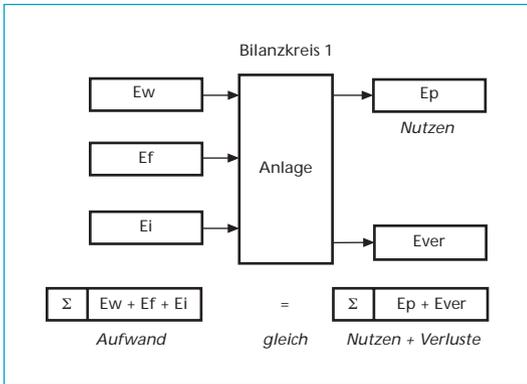


Abb. 3-1. Prinzipielle Darstellung eines Bilanzschemas für die Energiebilanz mit den ein- und austretenden Strömen zur Erläuterung der Vorgehensweise bei der Ermittlung der Energieeffizienz, Symbole nach [3].

bei der Bewertung der Energieeffizienz einer Anlage vorzugehen ist. Für die ein- und austretenden Energieströme werden hier die gleichen Formelzeichen wie in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie [3] verwendet. In die Anlagen treten ein:

- der Energiestrom⁴ E_w im Abfall ($E_w = \dot{m}_{AF} \cdot h_{u,AF}$ mit \dot{m}_{AF} Abfallmassenstrom und $h_{u,AF}$ unterer Heizwert des Abfalls),
- der Energiestrom E_f in den Brennstoffen „die zur Erzeugung von Dampf beitragen“,
- sonstige eintretende („importierte“) Energieströme E_i , wie z.B. in Hilfsstoffen, als Kondensatrückläufe, in Form von elektrischer Energie usw.

Aus der Anlage treten aus

- der nutzbare („produzierte“) Energiestrom E_p ,
- der nicht nutzbare Energiestrom, d.h. die Anlagenverluste E_{ver} , z.B. Abgasverluste, Verluste in den festen Rückständen, Abstrahlungsverluste usw.

Als Maßzahl für die Bewertung der Energieeffizienz der Anlage (Index „A“) dient der Anlagenwirkungsgrad, der sich formal als Verhältnis des erzeugten Nutzens zu dem für die Erzielung dieses Nutzens erforderlichen Aufwand ergibt

$$\eta_A = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{E_p}{E_w + E_f + E_i} \quad (1).$$

Möchte man die Energieeffizienz der Anlage bezogen nur auf den eingesetzten Abfall bewerten – um dann verschiedene Anlagen tatsächlich auch vergleichen zu können – muss die neben dem Abfall zusätzlich eingetragene Energie (E_f und

⁴ Bei der Erläuterung der Wirkungsgrade und der „Energieeffizienz“ nach [3] wird im Folgenden verkürzt von „Energien“ anstelle von „Energieströmen“ gesprochen.

E_i in Abb. 3-1) von der Nutzenergie⁵ (E_p) abgezogen werden. Als Nutzen verbleibt dann der so genannte Netto-Nutzen $E_p - (E_f + E_i)$. Diese Differenzbildung wird zweckmäßig durch einen neuen Bilanzkreis und einen (rechnerisch) rückgeführten Strom $E_f + E_i$ verdeutlicht. Abb. 3-2 zeigt die prinzipielle Darstellung aus Abb. 3-1 ergänzt um den Bilanzkreis 2 und den Rückführungsstrom $E_f + E_i$. Dem Bilanzkreis 2 wird somit nur noch die an den Abfall gebundene Energie zugeführt.

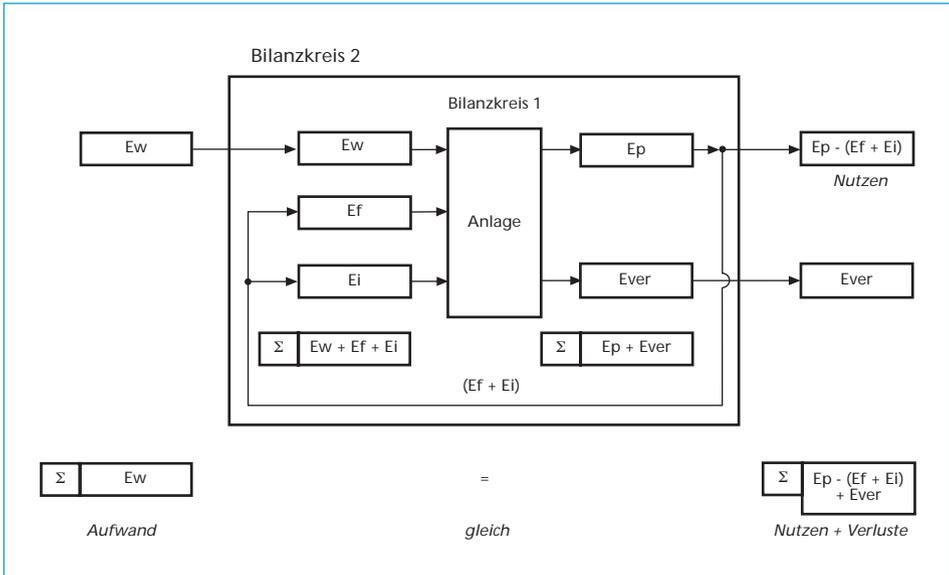


Abb. 3-2. Prinzipielle Darstellung eines Bilanzschemas für die Energiebilanz (hier mit Rückführung) mit den ein- und austretenden Strömen zur Erläuterung der Vorgehensweise bei der Ermittlung der Energieeffizienz, Formelzeichen nach [3].

Die somit nur auf den Abfall als einzigem Aufwand (Bilanzkreis 2) bezogene Bewertung der Energieeffizienz der Anlage mit Hilfe des Verhältnisses des Netto-Nutzens zu dem für die Erzielung dieses Netto-Nutzens erforderlichen Aufwand (nur im Abfall) ergibt sich entsprechend formal als Netto-Anlagenwirkungsgrad mit

$$\eta_{A,Netto} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{E_w} \quad (2).$$

In dem Vorschlag für die Ermittlung der Energieeffizienz einer Anlage in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie [3] wird demgegenüber der Netto-Nutzen $E_p - (E_f + E_i)$ nicht auf den eintretenden Abfall bezogen, sondern auf die Summe

⁵ In Anlehnung an [7] wird in [1] hierfür der Begriff „Zielenergie“ verwendet. Nach rechnerischer Rückführung der neben dem Abfall eintretenden Energie von der Zielenergie verbleibt die „Netto-Zielenergie“.

aus der in dem Abfall enthaltenen Energie E_w und der mit dem Zusatzbrennstoff zugeführten Energie E_f , multipliziert mit dem Faktor 0,97

$$\text{Energieeffizienz nach [3]} = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 \cdot (E_w + E_f)} \quad (3).$$

Zu diesem Vorschlag sind insbesondere vier Kritikpunkte zu nennen, die nachfolgend noch näher erläutert werden:

1. Die als Zusatzenergie eingetragene Energie E_f steht als Aufwand im Nenner der Gleichung, obwohl diese in den Bilanzkreis 2 gar nicht eintritt und demzufolge auch keinen Aufwand für die verbleibende Netto-Nutzenergie darstellt. Der Quotient in Gleichung (3) entspricht somit formal nicht der Definition eines Wirkungsgrades.
2. Der Faktor 0,97, mit dem laut [3] Verluste „aufgrund von Rost- und Kesselasche sowie von Strahlung“ berücksichtigt werden, steht im Nenner der Gleichung und vermindert so den Aufwand, was zu einer entsprechenden rechnerischen Erhöhung der Energieeffizienz führt. Das würde bedeuten, dass mit zunehmenden Verlusten eine bessere Energieeffizienz errechnet wird.
3. Für die Ermittlung der Energieinhalte unterschiedlicher Energiearten werden Äquivalenzfaktoren verwendet, was zu Fehlern führt (siehe unten).
4. Für die Abgrenzung zwischen E_f und E_i ist es erforderlich, Zusatzbrennstoffe „die zur Erzeugung von Dampf beitragen“ von solchen Zusatzbrennstoffen zu unterscheiden, bei denen dies nicht der Fall ist.

zu Kritikpunkt 1

Die mit dem Zusatzbrennstoff eingetragene Energie E_f ist bei dem dargestellten Nettoansatz von dem zugehörigen Aufwand bereits in Abzug gebracht, d.h. am Bilanzkreis 2 als eintretende Energie nicht mehr vorhanden. Eine zusätzliche Addition der Energie E_f im Nenner ist daher unverständlich. Die Energieeffizienz wird dadurch sogar formal kleiner und lässt sich insgesamt – im Sinne einer Bewertung und eines sich an diese Bewertung anschließenden Vergleiches – physikalisch nicht mehr deuten (siehe Schwierigkeit bei der Einigung auf Faktoren zur Abgrenzung zwischen Verwertung und Beseitigung [3], [6]).

zu Kritikpunkt 2

Die Verluste einer Anlage, d.h. die nicht nutzbare, aus der Anlage austretende Energie, sind als solche nicht mit dem Aufwand in Verbindung zu bringen. Es kann nicht sein, dass die Berücksichtigung eines Verlustes (hier „aufgrund von Rost- und Kesselasche sowie von Strahlung“) zu einer Verbesserung der Energieeffizienz führt (Faktor < 1 im Nenner).

Da der Wert 0,97 nur geringfügig kleiner 1 ist, besitzt dieser (im Hinblick auf die insgesamt erzielbare Genauigkeit der Berechnung⁶) keine wesentliche Bedeutung für die Ermittlung der Energieeffizienz. Er ist an dieser Stelle jedoch von

⁶ Die Genauigkeit der ermittelbaren Energieeffizienz einer Abfallbehandlungsanlage wird v.a. durch die erzielbare Genauigkeit bei der Berechnung der mit dem Abfall eingetragenen Energie E_w aus dem Massenstrom und dem Heizwert des Abfalls bestimmt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Heizwert nicht als Messwert vorliegt, sondern aus anderen Messgrößen (die wiederum nur mit einer bestimmten Genauigkeit erfasst werden können) rechnerisch bestimmt werden muss.

der Methode her falsch und führt so aus formalen Gründen zu Schwierigkeiten bei der Festlegung von Faktoren zur Abgrenzung zwischen Verwertung und Beiseitigung.

zu Kritikpunkt 3

Äquivalenzwerte dienen der Umrechnung unterschiedlicher Ausgangsdaten in gleichwertige Ersatzdaten und werden aus der Betrachtung einer Vielzahl von gleichen oder ähnlichen Rohstoffen oder Anlagen gebildet. Sie besitzen daher die Eigenschaft eines Mittelwertes und sind nur für Überschlagsrechnungen geeignet. Mit Äquivalenzwerten können keine Bilanzierungen an konkreten Anlagen durchgeführt werden, da sich dabei in der Regel Widersprüche ergeben.

Die Beurteilung einer Anlage ist nur mit den zugehörigen Einzelkennwerten (z.B. mit dem spezifischen Energiebedarf, Wirkungsgrad, spezifischen Emissionsmassenströmen, Energieaustauschverhältnissen usw.) möglich.

Die folgenden Beispiele zeigen, dass bei bestimmten Anlagenkonfigurationen durch die Verwendung von Äquivalenzwerten auch Ergebnisse für die Energieeffizienz größer 100 % entstehen können, d.h. dass mehr Nutzenergie die Anlage verlässt, als ihr als Aufwand zugeführt wird! Für die Beispiele wurde die in [3] aufgeführte Berechnungsgleichung mit der in [1] dargestellten Methode verglichen. Die in [1] dargestellte Methode folgt der in [7] beschriebenen.

zu Kritikpunkt 4

Eine Aufteilung der Zusatzbrennstoffe in „dampferzeugend“ und „nicht dampferzeugend“ ist im täglichen Betrieb der Anlage nur bedingt möglich. Die Erfahrung zeigt, dass eine solche Unterscheidung in der Praxis nur überschlägig gemacht wird (z.B. 25/75 %-Aufteilung des für den An- und Abfahrbetrieb eingesetzten Heizöls in [6]). Andererseits ist E_f und E_i gegenüber E_w sehr gering (in [6] jeweils 1 %), wodurch die Aufteilung grundsätzlich irrelevant wird⁷.

4 Gegenüberstellung des Vorschlages im Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie mit der in den Richtlinien VDI 3460 Blatt 2 und VDI 4661 vorgestellten Methode

4.1 Prinzipielles Beispiel zur Problematik der Äquivalenzwerte

Für die Gegenüberstellung sei eine thermische Abfallbehandlungsanlage betrachtet, die elektrische und thermische Energie erzeugt. In Anlehnung an die in [7] verwendeten Bezeichnungen hat diese Anlage damit eine „Stromausbeute“ α und eine „Wärmeausbeute“ β , die sich jeweils auf den eingesetzten Brennstoff

⁷ Diese Unterscheidung resultiert historisch aus den Anforderungen eines Vorschlages für die näherungsweise Heizwertermittlung in MVA, hat also ursächlich überhaupt nichts mit der Ermittlung der Energieeffizienz zu tun [5].

beziehen (entspricht der Betrachtungsweise in Abb. 3-2, Bilanzkreis 2). Es ist

$$\alpha_{(VDI4661)} = \eta_{Netto, EL(VDI3460)} = \frac{P_{EL}}{\dot{m}_{AF} \cdot h_{u,AF}} \quad (4)$$

und

$$\beta_{(VDI4661)} = \eta_{Netto, TH(VDI3460)} = \frac{\dot{Q}_{TH}}{\dot{m}_{AF} \cdot h_{u,AF}} \quad (5).$$

Die gesamte „Energieausbeute“ bzw. der so genannte Brennstoffnutzungsgrad ω nach [7], der in [1] als Netto-Wirkungsgrad, gesamt $\eta_{Netto,Gesamt}$ bezeichnet wird, beträgt

$$\omega_{(VDI4661)} = \eta_{Netto,gesamt(VDI3460)} = \frac{P_{EL} + \dot{Q}_{TH}}{\dot{m}_{AF} \cdot h_{u,AF}} \quad (6)$$

wobei gilt

$$\omega_{(VDI4661)} = \eta_{Netto,gesamt(VDI3460)} = \alpha + \beta = \eta_{Netto,EL} + \eta_{Netto,TH} \quad (7).$$

Für den Vergleich mit der Berechnungsgleichung nach [3] wird zur Vereinfachung und der besseren Übersicht wegen die mit dem Zusatzbrennstoff eingebrachte Energie und die sonstige importierte Energie vernachlässigt: $Ef = 0$ und $Ei = 0$. Weiterhin wird der Faktor 0,97 im Nenner der Berechnungsgleichung nach [3] mit dem Wert 1,00 angesetzt. Dann wird in Gleichung (3) unter Berücksichtigung der in [3] angegebenen Äquivalenzwerte \ddot{a}_{EL} und \ddot{a}_{TH}

$$Ep - (Ef + Ei) = Ep = \ddot{a}_{EL} \cdot P_{EL} + \ddot{a}_{TH} \cdot \dot{Q}_{TH} \quad (8).$$

Mit $Ew = \dot{m}_{AF} \cdot h_{u,AF}$ wird somit die „Energieeffizienz“ nach [3] analog zu den Gleichungen (6) und (7)

$$\text{Energieeffizienz nach [3]} = \omega^* = \alpha^* + \beta^* = \frac{\ddot{a}_{EL} \cdot P_{EL} + \ddot{a}_{TH} \cdot \dot{Q}_{TH}}{\dot{m}_{AF} \cdot h_{u,AF}} \quad (9).$$

Im Folgenden werden nun zwei Fälle betrachtet, die – im Hinblick auf die allgemeine Gültigkeit einer Methode für die Ermittlung der Energieeffizienz – beispielhaft für Energieumwandlungsprozesse in Kraftwerken und in thermischen Abfallbehandlungsanlagen gewählt seien. In Fall 1 beträgt die Stromausbeute $\alpha = 30\%$ und die Wärmeausbeute $\beta = 40\%$, in Fall 2 ist $\alpha = 15\%$ und $\beta = 40\%$. Für beide Fälle gilt gemäß [3] $\ddot{a}_{EL} = 2,6$. Zusätzlich werden diese Fälle unterteilt. Im oberen Teil der Tab. 4-1 ist gemäß [3] ein Wert $\ddot{a}_{TH} = 1,1$ angesetzt. Im unteren Teil der Tab. 4-1 ist zur Darlegung der Sensitivität ein Wert $\ddot{a}_{TH} = 1,0$ angesetzt. Die Methode nach [1] und [7] ist unabhängig von Äquivalenzwerten (!) was aus Bilanzgründen auch so sein muss.

Tab. 4-1. Ergebnisse der Ermittlung der Energieeffizienz nach unterschiedlichen Berechnungsgleichungen für das prinzipielle Beispiel

Fall	Methode nach VDI 3460 Blatt 2 [1] bzw. VDI 4661 [7]			Vorschlag in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie [3] mit $\ddot{a}_{EL} = 2,6$ und $\ddot{a}_{TH} = 1,1$		
	α	β	ω	α^*	β^*	ω^*
	$\eta_{Netto,EL}$	$\eta_{Netto,TH}$	$\eta_{Netto,gesamt}$			
1a	30 %	40 %	70 %	78 %	44 %	122 %
2a	15 %	40 %	55 %	39 %	44 %	83 %
				Vorschlag in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie [3] mit $\ddot{a}_{EL} = 2,6$ und $\ddot{a}_{TH} = 1,0$		
1b	30 %	40 %	70 %	78 %	40 %	118 %
2b	15 %	40 %	55 %	39 %	40 %	79 %

Da unter den hier gewählten Annahmen der Wert ω^* der „Energieeffizienz“ nach [3] entspricht, zeigt dies, dass sich nach dem Vorschlag in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie Werte für die Energieeffizienz $> 100\%$ ergeben können. Bei zusätzlicher Berücksichtigung des Faktors 0,97 werden diese Werte noch größer. Der Einfluss von Ef und Ei ist demgegenüber im praktischen Betrieb gering [6]. Auch wenn für die Energieeffizienz Werte unter 1 bzw. 100 % ermittelt werden, so ist aus dem voran stehenden deutlich, dass diese viel zu hoch sind.

4.2 Beispiel aus der praktischen Anwendung

Für die Darstellung der Ermittlung der Energieeffizienz in der Praxis sei hier das in [6] aufgeführte, konkrete Anlagenbeispiel näher betrachtet. In diesem Beispiel sind gegeben (jeweils unter Pkt. II Berechnung in [6])⁸:

1.1 elektrische Energie

in Summe („am Generator“)	115.954 MWh _{EL} /a
Eigenbedarf	26.361 MWh _{EL} /a
d.h. abgegeben	89.593 MWh _{EL} /a

1.2 Dampf + Dampf abgegeben

Eigenbedarf	47.841 MWh _{TH} /a
abgegeben	30.736 MWh _{TH} /a
d.h. in Summe	78.577 MWh _{TH} /a

2.1 Heizöl 4.438 MWh/a für Stützfeuerung (Ef)

2.2 Heizöl (75 %) 3.472 MWh/a für An- und Abfahrbetrieb (Ef)

⁸ Es wurden die gerundeten Werte übernommen.

- 3.1 Heizöl (25 %) 1.157 MWh/a für An- und Abfahrbetrieb (E_i)
- 3.2 Erdgas 3.922 MWh/a (E_i)
- 3.3 Notstrom⁹ 357 MWh/a (E_i)
- 4. Abfall 600.891 MWh/a (E_w)

Diese Angaben müssen zunächst in ein Bilanzschema mit Bilanzgrenzen eingetragen werden, um deutlich zu machen, was die Größen E_p , E_i , E_f usw. in der betrachteten Anlage bedeuten (vergleiche Abb. 3-1).

Methodisch lässt sich dies mit Hilfe eines „Bilanzkreises 0“ zeigen, der eine Untergliederung des „Bilanzkreises 1“ und damit die Anlage ohne interne Rückführungen darstellt (Abb. 4-1).

In den „Bilanzkreis 0“ treten als Einsatzenergie – neben dem Abfall, den Zusatzbrennstoffen und der sonstigen von außen (außerhalb der Anlage) zugeführten Energie – auch der Eigenbedarf an elektrischer und thermischer Energie ein. Den „Bilanzkreis 0“ verlassen die in der Anlage erzeugte elektrische und thermische Energie, jeweils einschließlich des Eigenbedarfs und der Verluste (Abgas- und Abstrahlungsverluste, Verluste in den Rückständen usw.).

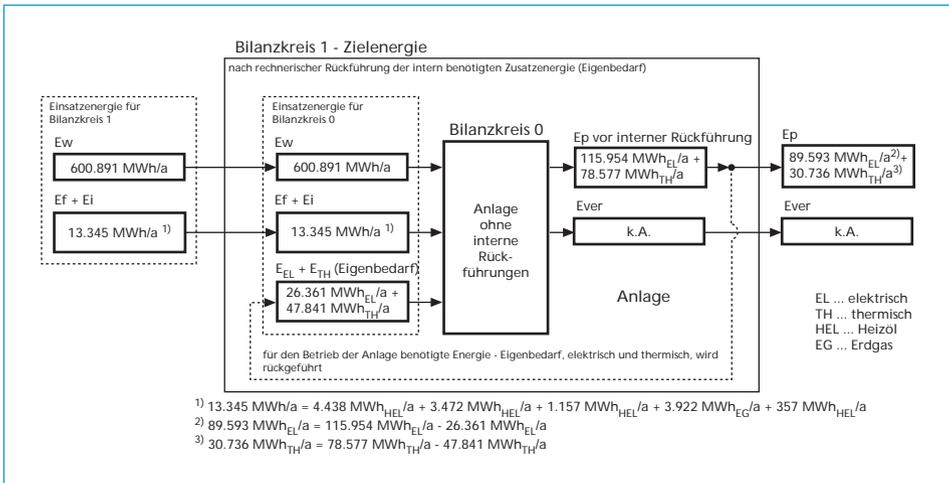


Abb. 4-1. Prinzipielles Bilanzschema einer Anlage und Zuordnung der für das praktische Anlagenbeispiel angegebenen Zahlenwerte.

Man muss für den Betrieb der Anlage den erforderlichen Eigenbedarf an elektrischer und thermischer Energie selbstverständlich zur Verfügung stellen (z.B. für den Antrieb der Ventilatoren). D.h. von der Energie, die unmittelbar nach dem Generator abgegeben wird (115.954 MWh_{EL}/a), muss der Eigenbedarf (26.361 MWh_{EL}/a) abgezogen werden. Für die thermische Energie (Dampf) gilt

⁹ Da für die Ermittlung des Energieinhaltes derselbe Heizwert wie für Heizöl verwendet wird, ist davon auszugehen, dass unter dem Begriff „Notstrom“ ebenfalls Heizöl zu verstehen ist.

das gleiche, d.h. von 78.577 MWh_{TH}/a muss der Eigenbedarf von 47.841 MWh_{TH}/a abgezogen werden. Durch diese Vorgehensweise erhält man den „Bilanzkreis 1“ für die Anlage (siehe Abb. 4-1). In den „Bilanzkreis 1“ treten nun der Abfall, die Zusatzbrennstoffe und die sonstige von außen zugeführte Energie ein.

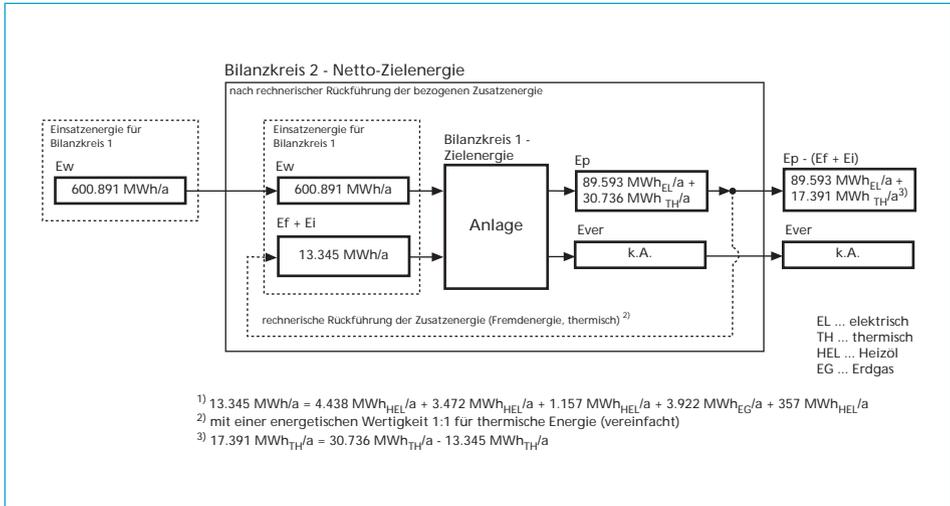


Abb. 4-2. Erweiterung des prinzipiellen Bilanzschemas einer Anlage und Zuordnung der für das praktische Beispiel angegebenen Zahlenwerte.

Den „Bilanzkreis 1“ verlassen die nutzbare elektrische und thermische Energie sowie die Verluste.

Für die energetische Bewertung der Anlage können diese Werte nun in ein Bilanzschema entsprechend den Abb. 3-1 und Abb. 3-2 eingetragen werden. Man erhält dann das in Abb. 4-2 dargestellte Bild.

Auf Grundlage der Abb. 4-2 kann die Energieeffizienz der betrachteten Anlage nach [3] und nach [1] bzw. [7] wie folgt ermittelt werden:

I. Ermittlung der Energieeffizienz nach [1] und [7]

Nach [1] und [7] ergibt sich der Wirkungsgrad einer Anlage als Verhältnis von Nutzen zu Aufwand an dem zugehörigen Bilanzkreis (Bilanzkreis 1 und 2 bzw. Abb. 4-2). Geht man davon aus, dass neben dem Abfall im Wesentlichen Heizöl und Erdgas in die Anlage eintreten (nähere Angaben hierzu in [6]) betragen entsprechend die Abb. 4-1 und Abb. 4-2 die

Wirkungsgrade der Anlage (siehe Bilanzkreis 1 in Abb. 4-1)

$$\eta_{EL(VDI\ 3460)} = \frac{P_{EL}}{\sum \dot{E}_{Ein}} = \frac{89.593}{600.891 + 13.345} = \frac{89.593}{614.236} = 14,6\% \quad (10)$$

$$\eta_{TH(VDI\ 3460)} = \frac{\dot{Q}_{TH}}{\sum \dot{E}_{Ein}} = \frac{30.736}{600.891 + 13.345} = \frac{30.736}{614.236} = 5,0\% \quad (11)$$

$$\eta_{Gesamt(VDI\ 3460)} = \frac{P_{EL} + \dot{Q}_{TH}}{\sum \dot{E}_{Ein}} = \frac{89.593 + 30.736}{600.891 + 13.345} = \frac{120.329}{614.236} = 19,6\% \quad (12)$$

und die

Netto-Wirkungsgrade¹⁰ (siehe Bilanzkreis 2 in Abb. 4-2)

$$\alpha_{(VDI\ 4661)} = \eta_{Netto,EL(VDI\ 3460)} = \frac{P_{EL,Netto}}{\dot{m}_{AF} \cdot h_{u,AF}} = \frac{89.593}{600.891} = 14,9\% \quad (13)$$

$$\beta_{(VDI\ 4661)} = \eta_{Netto,TH(VDI\ 3460)} = \frac{\dot{Q}_{TH,Netto}}{\dot{m}_{AF} \cdot h_{u,AF}} = \frac{30.736 - 13.345}{600.891} = \frac{17.391}{600.891} = 2,9\% \quad (14).$$

$$\begin{aligned} \omega_{(VDI\ 4661)} = \eta_{Netto,gesamt(VDI\ 3460)} &= \frac{P_{EL,Netto} + \dot{Q}_{TH,Netto}}{\dot{m}_{AF} \cdot h_{u,AF}} = \frac{89.593 + (30.736 - 13.345)}{600.891} \\ &= \frac{89.593 + 17.391}{600.891} = \frac{106.984}{600.891} = 17,8\% \quad (15). \end{aligned}$$

Mit der Bildung des Netto-Wirkungsgrades wird deutlich, dass im vorliegenden Fall für das praktische Beispiel in [6] eine energetische Verwertung vorliegt, da der Netto-Wirkungsgrad > 0 ist. Ein Netto-Wirkungsgrad > 0 heißt, dass der verbleibende Netto-Nutzen aus dem Verfahren positiv ist.

II. Ermittlung der Energieeffizienz nach Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie [3]

Mit den Vorgaben in [3] und den in Abb. 4-2 dargestellten Werten ergibt sich für das Beispiel eine „Energieeffizienz“ von

$$\begin{aligned} \text{Energieeffizienz nach [3]} &= \frac{2,6 \cdot 89.593 + 1,1 \cdot 30.736 - (7.909 + 5.436)}{0,97 \cdot (600.891 + 7.909)} \\ &= \frac{266.751 - (7.909 + 5.436)}{0,97 \cdot (600.891 + 7.909)} = 0,43 = 42,9\% \quad (16). \end{aligned}$$

Es ist im vorliegenden Fall selbstverständlich zu berücksichtigen, dass bei der Ermittlung der „produzierten“ Energie E_p gemäß [6] von der insgesamt erzeugten elektrischen und thermischen Energie ein „Eigenbedarf“ für den Betrieb der

¹⁰ Ausgehend von einem Energieaustauschverhältnis $E = 1$ für die rechnerische Rückführung der thermischen Energie. Im Gegensatz zu Abschnitt 4.1 werden für die Abgrenzung zu Gleichung (10) bis (12) hier die Indices „Netto“ für die elektrische und thermische Energie eingeführt.

Anlage von 26.361 MWh_{EL}/a elektrische Energie und 47.841 MWh_{TH}/a thermische Energie (v.a. als Niederdruckdampf) abzuziehen sind. Der Eigenbedarf einer Anlage verlässt diese nicht als eine für einen externen Abnehmer (Nutzer) „produzierte“ Energie.

III. Ermittlung der Energieeffizienz nach Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie und [6]

Für die Energieeffizienz einer Anlage muss es ohne Bedeutung sein, ob die für den Betrieb der Anlage benötigte Eigenenergie in der Anlage selbst erzeugte „Eigenenergie“ darstellt oder der Anlage als extern bezogene „Fremdenergie“ zugeführt wird. Daher ist die Vorgehensweise, die als Eigenbedarf benötigte Energie (im vorliegenden Fall elektrische Energie und Dampf) dem Nutzen zuzurechnen, falsch.

In der in [6] vorgeführten Beispielrechnung wird hingegen davon ausgegangen, dass die „produzierte“ Energie E_p die als Eigenenergie in der Anlage benötigte Energie mit einschließt, ohne dass diese als zusätzlicher Aufwand mit berücksichtigt wird. Mit den in [6] genannten Zahlenwerten ergibt sich eine „Energieeffizienz“ von

Energieeffizienz nach [3]

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2,6 \cdot 115.954 + 1,1 \cdot 30.736 + 1,0 \cdot 47.841 - (7.909 + 5.436)}{0,97 \cdot (600.891 + 7.909)} \\
 &= \frac{383.130 - (7.909 + 5.436)}{0,97 \cdot (600.891 + 7.909)} = 0,63 = 62,6 \% \quad (17).
 \end{aligned}$$

Die ermittelten Energieeffizienzen für die dargestellten Fälle I. bis III. sind zusammengefasst in Tab. 4-2 dargestellt.

Tab. 4-2. Ergebnisse der Ermittlung der Energieeffizienz nach unterschiedlichen Berechnungsgleichungen für das praktische Beispiel (im Gegensatz zu Tab. 4-1 beziehen sich die Fälle II. und III. hier nicht auf unterschiedliche Äquivalenzwerte sondern auf unterschiedliche Interpretationen der „produzierten Energie“ E_p in der Berechnungsgleichung nach [3]).

Fall	Ermittlung der Energieeffizienz für das praktische Beispiel aus [6] nach	Energieeffizienz	
I.	Methode nach VDI 3460 Blatt 2 [1] bzw. VDI 4661 [7]	ω bzw. $\eta_{\text{Netto,gesamt}}$	18 %
II.	Vorschlag in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie [3] mit $\ddot{a}_{\text{EL}} = 2,6$ und $\ddot{a}_{\text{TH}} = 1,1$ Ep ist die von der Anlage abgegebene, tatsächliche nutzbare Energie	ω^*	43 %
III.	Vorschlag in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie [3] mit $\ddot{a}_{\text{EL}} = 2,6$ und $\ddot{a}_{\text{TH}} = 1,1$ Ep schließt die als Eigenbedarf für den Betrieb der Anlage benötigte, nicht nutzbare bzw. nicht abgegebene Energie ein	ω^*	63 %

Der erhebliche Unterschied zwischen den Berechnungsergebnisse im Fall II. und III. zeigt die Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Energieeffizienz nach dem Vorschlag in [3], insbesondere bei der Zuordnung der in der jeweils betrachteten Anlage ermittelten Zahlenwerte für die einzelnen Energien (E_p , E_i usw.). Eine wesentliche Ursache für die entstehenden Zuordnungsschwierigkeiten ist das Fehlen eines schlüssigen Bilanzierungsschemas mit den zu bewertenden Bilanzkreisen und allen an diesen Bilanzkreisen ein- und austretenden Energieströmen. An dem Ergebnis $\omega^* = 43 \%$ (Fall II.) und $\omega^* = 62 \%$ (Fall III.) sieht man auch, dass die mehrfach geäußerte Befürchtung, viele MVA liegen unter einem „Faktor 0,5 bzw. 50 %“ berechtigt ist (unabhängig davon, dass wie oben gezeigt, die Einbringung von Äquivalenzwerten viel zu hohe Werte liefert). Ein Maßstab für ein „einwandfreies technisches Vorgehen“ gemäß [4] ist deshalb mit dem Entwurf nach [3] nicht gegeben. In dem vorliegenden Fall ergibt sich $\omega = 18 \%$, also $\omega > 0$, d.h. es ist aus technisch-wissenschaftlicher und technisch-wirtschaftlicher Sicht (siehe [4]) eine energetische Verwertung des Abfalls festzustellen, weil sich ein energetischer Nutzen ergibt.

5 Literatur

- [1] Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.): Richtlinie VDI 3460 Blatt 2 Emissionsminderung – Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung – Entwurf Mai 2006.
- [2] Stellungnahmen der Behörden: Bayerisches Landesamt für Umwelt; Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt; Niedersächsisches Umweltministerium; Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft; Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen; Umweltbundesamt Dessau.
- [3] Kommission der europäischen Gemeinschaften (Hrsg.): Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates über Abfälle (von der Kommission vorgelegt). Brüssel, den 21.12.2005 KOM(2005) 667 endgültig – 2005/0281 (COD), Anhang II, S. 34.
- [4] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Richtlinie VDI 1000 – Richtlinienarbeit – Grundsätze und Anleitungen. März 1999, Beuth-Verlag Berlin.
- [5] Integrated Pollution Prevention Control – Reference Document on the best Available Techniques for Waste Incineration – Final Draft May 2005 (2.3 The energy recovery stage, 3.5 Energy consumption and production).
- [6] Schreiben von Herrn Kleppmann, Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V. (ITAD) an Herrn MDgt Dr. H. Wendenburg, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 24. Mai 2006.
- [7] VDI 4661: Energiekenngrößen – Definitionen – Begriffe – Methodik. Beuth-Verlag GmbH Berlin, September 2003.