

Abnahmeversuche an Dampferzeugern

(VDI-Dampferzeugerregeln)

DIN
1942

 Acceptance test code for steam generators
 (VDI-rules for steam generators)

Ersatz für Ausgabe 06.79

 Essais d'acceptance pour générateurs de vapeur
 (règles du VDI pour générateurs de vapeur)

Inhalt

	Seite		Seite
1 Anwendungsbereich, Zweck und Umfang der Regeln	3	5.3 Temperatur	8
1.1 Anwendungsbereich	3	5.4 Masse und Massenstrom	9
1.2 Zweck und Umfang	3	5.4.1 Wägung	9
1.3 Allgemeine Hinweise	3	5.4.2 Volumenstrommessung	9
2 Formelzeichen, Einheiten, Zahlenwerte	4	5.4.3 Durchflußmessung	9
2.1 Formelzeichen, Einheiten	4	5.4.3.1 Durchflußmessung mit Blenden und Düsen	9
2.1.1 Lateinische Buchstaben	4	5.4.3.2 Durchflußmessung mit Geschwindigkeitssonden	9
2.1.2 Griechische Buchstaben	4	5.4.4 Staubmassenstrommessung	9
2.1.3 Indizes	4	5.4.5 Dichtebestimmung	9
2.2 Zahlenwerte	5	5.5 Heizwert	9
3 Voraussetzungen und Gegenstand der Gewährleistung	5	5.5.1 Heizwert der Brennstoffe	9
3.1 Voraussetzungen	5	5.5.2 Probenahme von Brennstoffen	9
3.2 Gegenstand	5	5.5.3 Heizwert und Probenahme der Verbrennungsrückstände	9
3.3 Messungen zur allgemeinen Beurteilung der Anlage	5	5.6 Chemische Zusammensetzung	10
3.4 Beteiligung verschiedener Firmen an der Lieferung	5	5.6.1 Brennstoffe	10
4 Versuchsvoraussetzungen und Versuchsbedingungen	5	5.6.2 Flugstaub und Asche	10
4.1 Methoden der Wirkungsgradbestimmung	5	5.6.3 Rauchgas	10
4.2 Versuchsbedingungen	6	5.7 Elektrische Leistung	10
4.3 Vorversuche	6	6 Energiebilanz und Wirkungsgrad	10
4.4 Zustand des Dampferzeugers	6	6.1 Energiebilanz, Systemgrenze	10
4.5 Beharrungszustand	6	6.1.1 Allgemeines	10
4.5.1 Erreichen des Beharrungszustandes	6	6.1.2 Normal-System	10
4.5.2 Prüfung des Beharrungszustandes	6	6.1.3 Weitere Systeme	10
4.5.3 Einstellung der Feuerung	6	6.1.3.1 Allgemeines	10
4.6 Versuchsdurchführung	6	6.1.3.2 System ohne Kalorifer	11
4.6.1 Versuchsdauer	6	6.1.3.3 System mit Frischluftgebläse	11
4.6.2 Zustand zu Beginn und Ende des Versuches	6	6.1.3.4 System mit Entstauber bzw. mit Entstauber und Rauchgasgebläse	11
4.6.3 Zeitabstände der Ablesungen, Ablese-Intervalle	6	6.1.3.5 System mit einer Brüdenabscheidung an der Mahlanlage	11
4.6.4 Zulässige Schwankungen	7	6.1.3.6 Systeme bei integrierten Rauchgasentschwefelungs- und Denox-Anlagen	11
4.7 Sonstige Hinweise	7	6.1.3.7 Sonderfälle	11
5 Meßgeräte und Meßverfahren	8	6.2 Bezugstemperatur	11
5.1 Allgemeine Bemerkungen	8	6.3 Zu- und abgeführte Energieströme	13
5.2 Drücke und Differenzdrücke	8	6.3.1 Nutzwärmeleistung	13
		6.3.2 Zugeführte Energieströme	15
		6.3.2.1 Allgemeines	15

Fortsetzung Seite 2 bis 50

Normenausschuß Überwachungsbedürftige Anlagen (NÜA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

	Seite		Seite
6.3.2.2 Dem verbrannten Brennstoff proportional zugeführte Energieströme	15	7.3.1 Meßabweichungen	26
6.3.2.3 Brennstoffstromunabhängige zugeführte (zeitbezogene) Energieströme	15	7.3.2 Standardabweichungen, Vertrauensgrenzen, Meßunsicherheit	27
6.3.2.4 Gesamter zugeführter Energiestrom	16	7.3.3 Unsicherheiten von Stoffwerten und Beiwerten	27
6.3.3 Abgeführte Energieströme (Verluste)	16	7.3.4 Begrenzte Fehlerverteilung	27
6.3.3.1 Allgemeines	16	7.3.5 Meßunsicherheit eines rechnerischen Ergebnisses	27
6.3.3.2 Abgasverlust	16	7.3.6 Mehrfachmessung einer Meßgröße	27
6.3.3.3 Verlust durch unvollkommene Verbrennung ...	16	7.4 Richtwerte für Meßunsicherheiten	27
6.3.3.4 Verluste durch die Enthalpie und das Unverbrannte in der Schlacke und im Flugstaub	16	7.4.1 Allgemeines	27
6.3.3.5 Weitere, zeitbezogene Verluste	17	7.4.2 Meßunsicherheit der Zustandsgrößen	28
6.3.3.6 Verluste durch Strahlung und Leitung	17	7.4.2.1 Druck, Druckdifferenz	28
6.3.3.7 Gesamtverluste	18	7.4.2.2 Temperatur	28
6.3.4 Berechnung der bezogenen Rauchgas- und Verbrennungsluftmassen und der spezifischen Wärmekapazität	19	7.4.2.3 Enthalpie, Enthalpiedifferenz und spezifisches Volumen von Wasserdampf ...	29
6.3.4.1 Bezogene Rauchgas- und Verbrennungsluftmassen	19	7.4.3 Meßunsicherheiten der Massenströme	30
6.3.4.2 Elementare Verbrennungsrechnung	19	7.4.3.1 Wägung	30
6.3.4.2.1 Feste Brennstoffe und Heizöl	19	7.4.3.2 Volumenmessung	30
6.3.4.2.2 Brenngase	19	7.4.3.3 Durchflußmessung	30
6.3.4.3 Statistische Verbrennungsrechnung	20	7.4.3.4 Abschlußunsicherheit	30
6.3.4.3.1 Feste Brennstoffe (Kohle > 15 % Fl. B.)	20	7.4.4 Meßunsicherheit des Heizwertes	31
6.3.4.3.2 Heizöl	20	7.4.4.1 Probenahme	31
6.3.4.3.3 Erdgas	20	7.4.4.2 Heizwert	31
6.3.4.4 Spezifische Wärmekapazität des Rauchgases und der Verbrennungsluft	20	7.4.5 Meßunsicherheiten der bezogenen Rauchgas- und Verbrennungsluftmassen und der spezifischen Wärmekapazität	31
6.3.5 Direktentschwefelung	22	7.4.5.1 Meßunsicherheit der CO ₂ -, O ₂ - und CO-Gehalte des trockenen Rauchgases	31
6.3.5.1 Allgemeines	22	7.4.5.2 Meßunsicherheit der Verbrennungsgleichungen	32
6.3.5.2 Kalkverhältnis und Entschwefelungsgrad ...	22	7.4.5.3 Meßunsicherheit der spezifischen Wärmekapazität der trockenen Luft und des Rauchgases	32
6.3.5.3 Verbrennungsrechnung	22	7.4.6 Meßunsicherheit der Verluste durch die Enthalpie und das Unverbrannte in der Schlacke und im Flugstaub	32
6.3.5.4 Energie- und Massebilanz	23	7.4.7 Meßunsicherheit weiterer Größen	33
6.3.5.5 Verluste durch die Enthalpie und das Unverbrannte der Asche	23	7.4.8 Vernachlässigbare Meßunsicherheiten	33
6.3.6 Zu- und abgeführte Energieströme bei gleichzeitiger Verfeuerung mehrerer Brennstoffe	23	7.5 Berechnung der Meßunsicherheit	33
6.3.6.1 Allgemeines	23	7.5.1 Meßunsicherheit des Wirkungsgrades bei direkter Bestimmung	33
6.3.6.2 Zugeführte Energieströme	24	7.5.2 Meßunsicherheit des Wirkungsgrades bei der indirekten Wirkungsgradbestimmung	34
6.3.6.3 Abgeführte Energieströme (Verluste)	24	7.5.3 Meßunsicherheit des gemessenen Wirkungsgrades	34
6.3.6.4 Berechnung der bezogenen Rauchgas- und Verbrennungsluftmassen	24		
6.4 Wirkungsgrad	24		
6.4.1 Definition	24		
6.4.2 Direkte Wirkungsgradbestimmung	24		
6.4.2.1 Meßgrößen	24		
6.4.2.2 Berechnung des Wirkungsgrades	25		
6.4.3 Indirekte Wirkungsgradbestimmung	25		
6.4.3.1 Meßgrößen	25		
6.4.3.2 Berechnung des Wirkungsgrades	25		
7 Mittelwertbildung und Meßunsicherheiten	26		
7.1 Allgemeines	26		
7.2 Mittelwertbildung und Berichtigung der Meßwerte	26		
7.2.1 Mittelwertbildung aus den Meßwerten	26		
7.2.2 Berichtigung der gemittelten Meßwerte	26		
7.3 Grundlagen der Meßunsicherheitsberechnungen	26		
		8 Umrechnung auf Gewährleistungsbedingungen	34
		8.1 Allgemeines	34
		8.2 Umrechnung bei abweichenden Eintrittsdaten auf der Wasser/Dampfseite	35
		8.3 Umrechnung des direkt gemessenen Wirkungsgrades auf die Gewährleistungsbedingungen	35
		8.4 Umrechnung des indirekt gemessenen Wirkungsgrades auf die Gewährleistungsbedingungen über die Energiebilanz	35
		8.4.1 Umrechnung bei einem abweichenden Heizwert des asche- und wasserfreien Brennstoffes	35

	Seite
8.4.2 Umrechnung bei einem abweichenden Ascheballast	36
8.4.3 Umrechnung bei einem abweichenden Wasserballast	36
8.4.4 Umrechnung bei einer abweichenden Brennstofftemperatur	36
8.4.5 Umrechnung bei einer abweichenden Verbrennungsluft-Temperatur	36
8.4.6 Umrechnung bei abweichender Luftfeuchte ...	37
8.5 Umrechnung des indirekt gemessenen Wirkungsgrades auf die Gewährleistungsbedingungen mit Änderung der Abgastemperatur	37

	Seite
8.5.1 Umrechnung bei einer abweichenden Speisewassertemperatur	37
8.5.2 Umrechnung bei einer abweichenden Lufttemperatur	38
8.6 Der Wirkungsgrad unter Gewährleistungsbedingungen	38
8.6.1 Direkte Wirkungsgradbestimmung	38
8.6.2 Indirekte Wirkungsgradbestimmung	38
8.6.3 Vergleich der Wirkungsgrade	39
9 Beispiele	39
Zitierte Normen und andere Unterlagen	48
Weitere Normen und andere Unterlagen	49

1 Anwendungsbereich, Zweck und Umfang der Regeln

1.1 Anwendungsbereich

Die Regeln gelten für Dampf- und Heißwassererzeuger mit eigener Feuerung einschließlich der zugehörigen Hilfseinrichtungen.

Dampf- und Heißwassererzeuger im Sinne dieser Regeln sind Behälter und Rohrleitungen in denen:

Wasserdampf von höherem als atmosphärischem Druck zum Zwecke der Verwendung außerhalb dieser Anordnungen erzeugt wird.

Wasser auf eine höhere Temperatur als die Siedetemperatur bei atmosphärischem Druck gebracht wird, zum Zwecke der Verwendung außerhalb der Anordnungen.

Der Dampferzeuger besteht im allgemeinen aus dem rauchgasbeheizten Verdampfer, dem Überhitzer, dem Zwischenüberhitzer, dem Speise-, Luft- und gegebenenfalls Brennstoffvorwärmer und der Feuerung.

Unter dem Begriff eigene Feuerung wird im Sinne dieser Regeln eine Einrichtung verstanden, mit deren Hilfe die chemisch gebundene Wärme eines Brennstoffes bekannter Beschaffenheit in fühlbare Wärme umgesetzt wird.

Es kann sich dabei um eine Rostfeuerung, eine Wirbelschicht-Feuerung oder eine Brennerfeuerung handeln.

Zu den Hilfseinrichtungen gehören die Brennstoffzuteiler, die Mahlanlage, das Frischluftgebläse, das Rauchgasgebläse, die Einrichtungen für die Abfuhr der Verbrennungsrückstände, der Dampf-, der Luft- sowie gegebenenfalls der Brennstoffvorwärmer und der Entstauber.

Nicht zum Anwendungsbereich gehören:

Anlagen für Sonderbrennstoffe (z. B. Müll);

druckaufgeladene Dampferzeuger (z. B. druckaufgeladene Wirbelschichtkessel);

Dampferzeuger in Kombianlagen.

Sinngemäß können die vorliegenden Regeln auch für Abnahmeversuche verwendet werden bei:

Anlagen ohne eigene Feuerung (z. B. Abhitzekessel);

Anlagen mit anderen Wärmeträgern (z. B. Gase, Thermoöle, Natrium).

Wenn die vorliegenden Regeln als Grundlage für Abnahmeversuche an den o. g. oder anderen Wärmeübertragungsanlagen gelten sollen, muß schon bei Vertragsabschluß auf die wesentlichen Besonderheiten hingewiesen werden. Es sind dann Vereinbarungen zu treffen, wie bei Messungen und Versuchsauswertungen diesen Besonderheiten Rechnung getragen wird.

1.2 Zweck und Umfang

Die vorliegenden Regeln bilden die Grundlage für die wärmetechnischen Abnahmeversuche an Dampferzeugern und Heißwassererzeugern mit einer eigenen Feuerung.

Die Abnahmeversuche sollen nachweisen, daß die Gewährleistungen für Wirkungsgrad und Leistung oder andere technische Bedingungen erfüllt sind.

Die Regeln enthalten u. a.:

Empfehlungen für die Durchführung der Abnahmeversuche (siehe Abschnitt 4),

die Festlegung der Bilanzgrenze des Dampferzeugers und die Definition des Wirkungsgrades (siehe Abschnitt 6),

Angaben über die Meßunsicherheiten (siehe Abschnitt 7), Beispiele für Abnahmeversuche (siehe Abschnitt 9).

1.3 Allgemeine Hinweise

Die Regeln enthalten eine Reihe Hinweise auf Vereinbarungen, die sich auf die Art und den Umfang des Abnahmeversuchs beziehen. Diese Vereinbarungen sind vor den Versuchen oder bereits bei Bestellung des Dampferzeugers bzw. Heißwassererzeugers festzulegen.

Die Vereinbarungen können sich z. B. auf folgende Punkte beziehen:

- Lieferungsumfang, Systemgrenze, Bezugstemperatur,
- direkte oder indirekte Methode der Wirkungsgradbestimmung,
- zusätzliche Messungen,
- Versuchsbedingungen wie Verschmutzungszustand, Beharrungszeit und Versuchsdauer,
- abweichende Versuchsbedingungen,
- Abschlämmen und Rußblasen,
- Verwendung anderer Meßgeräte, als im Abschnitt 5 aufgeführt,
- zu verwendende Dampf- und Tafeln für andere Stoffwerte,
- besondere Umrechnungsverfahren,
- Ort und Lage der Meßstellen.

2 Formelzeichen, Einheiten, Zahlenwerte

2.1 Formelzeichen, Einheiten

Die Formelzeichen in der folgenden Aufstellung stimmen soweit wie möglich mit den in DIN 1304 Teil 1 und Teil 5 und in DIN 1345 festgelegten Formelzeichen überein.

2.1.1 Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Benennung	Einheit
A	Ascheballast	—
c	spezifische Wärmekapazität	$\text{kJ}/(\text{kg K})$
$\bar{c}$	integrale spezifische Wärmekapazität	$\text{kJ}/(\text{kg K})$
G	Fehlergrenze	—
H_o	Brennwert	kJ/kg
H_u	Heizwert	kJ/kg
h	spezifische Enthalpie	kJ/kg
i	Zahl der Proben	—
J	bezogene Enthalpie der Rauchgase und Verbrennungsluft	kJ/kg
l	Einzelverlust	—
l	Anströmlänge	m
l_u	Verhältnis des unverbrannten zum zugeführten Brennstoffmassenstrom	—
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/s
n	Luftverhältnis am Kesselende	—
P	Leistung	kW
p	Druck	bar
Q	Wärmestrom	kW
r	Verdampfungswärme	kJ/kg
T	thermodynamische Temperatur	K
t	(Celsius) Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
u	Masseanteil des Unverbrannten	kg/kg
u	Meßunsicherheit	—
V	bezogenes Verbrennungsluft- und Rauchgasvolumen	m^3/kg
$\dot{V}$	Volumenstrom	m^3/h
v	spezifisches Volumen	m^3/kg
w	Geschwindigkeit	m/s
W	Wasserballast	—
x	Masseanteile des Rauchgases	kg/kg
x_{LT}	Masseanteil der Luft, bezogen auf die trockene Luft	kg/kg
y	Volumenanteil	m^3/m^3
y_{LT}	Volumenanteile der Luft, bezogen auf die trockene Luft	m^3/m^3
z	Zeit	h

2.1.2 Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Benennung	Einheit
α	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$
δ	partiell Differential	—
Δ	Differenz	—
ε	relative Meßunsicherheit	—
ε	Emissionsverhältnis	—
η	Wirkungsgrad	—
η	Entaschungsgrad	—
η	Entschwefelungsgrad	—
γ	Masseanteil des Brennstoffes	kg/kg
v	flüchtiger Anteil der Asche	kg/kg

Formelzeichen	Benennung	Einheit
ϱ	Dichte	kg/m^3
σ	Standardabweichung	—
μ	bezogene Verbrennungsluft- und Rauchgasmasse	kg/kg

2.1.3 Indizes

Index	für die Größe
A	Asche
Ab	Abschlämmwasser
Bo	zugeführter Brennstoff
B	Brennstoff, verbrannter Brennstoff
b	Bezugstemperatur
C	Kohlenstoff
Ca	Kalk
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
D	Frischdampf
E	Einspritzwasser
En	Entstauber
e	Endwert
F	Flugstaub
Fl.B.	Flüchtige Bestandteile
Fü	Fühler
fa	Falschluff
G	Rauchgas, Abgas
g	Gewährleistung
gem	gemessen
ges	gesamt
H	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
K	Kessel
K	Zuschlagstoff (Kalk)
Ka	Kalorifer
Kü	Kühlwasser
L	Verbrennungsluft
M	Mühlen
m	mittlere
min	Minimum
N	Nutzen
N	Stickstoff
n	Normzustand
o	Nullpunkt 0°C
o	stöchiometrisch
O	Sauerstoff
O ₂	Sauerstoff
Pr	Probenahme
p	konstanter Druck
S	Schlacke
S	Schwefel
Sp	Speisewasser
St	Strahlung und Leitung
T	trocken
U	Umwälzpumpe, -Gebläse
u	unverbranntes
V	Verlust
W	Wand
w	wahrer
waf	wasser- und aschefrei
Z	zugeführte Energie

Index	für die Größe
Z	Zwischendampf
ZD	Zerstäuberndampf bzw. -luft
1	vor, Eintritt
2	hinter, Austritt
I, II	Zahl der Zwischenüberhitzer
^	maximal

2.2 Zahlenwerte

Benennung	Formelzeichen	Zahlenwert und Einheit
spezifische Verdampfungswärme bei 25 °C	r_b	2442,5 kJ/kg
spezifische Wärmekapazität des Dampfes zwischen 25 und 150 °C	$\bar{c}_{pD}$	1,884 kJ/(kg K)
spezifische Wärmekapazität des Wassers zwischen 25 und 150 °C	$\bar{c}_{pW}$	4,21 kJ/(kg K)
spezifische Wärmekapazität der Luft zwischen 25 und 150 °C	$\bar{c}_{pL}$	1,011 kJ/(kg K)
spezifische Wärmekapazität der Asche und des Flugstaubes zwischen 25 und 200 °C	$\bar{c}_A \bar{c}_F$	0,84 kJ/(kg K)
spezifische Wärmekapazität der Schlacke: bei Trockenfeuerung	$\bar{c}_S$	1,0 kJ/(kg K)
bei Schmelzfeuerung	$\bar{c}_S$	1,26 kJ/(kg K)
spezifische Wärmekapazität der Zuschlagstoffe zwischen 25 und 200 °C	$\bar{c}_{Ca}$ $CaCO_3$ $Ca(OH)_2$ CaO	0,97 kJ/(kg K) 1,32 kJ/(kg K) 0,84 kJ/(kg K)
spezifische Wärmekapazität der asche- und wasserfreien Kohle zwischen 25 und 150 °C	c_{Bwaf}	1,03 (1 + $\gamma_{FL.B.}$) kJ/(kg K)
Heizwert von CO	H_{uCO_n}	12,633 MJ/m ³
Heizwert des Unverbrannten: bei Steinkohle	H_{uu}	33,0 MJ/kg
bei Braunkohle	H_{uu}	27,2 MJ/kg

3 Voraussetzungen und Gegenstand der Gewährleistung

3.1 Voraussetzungen

Voraussetzungen für die Gewährleistungen sind alle äußeren Einflüsse, z. B.:

- Brennstoffeigenschaften (Zusammensetzung, Heizwert, Mahlbarkeit, Ascheschmelzverhalten), eventuell ein Brennstoffband,
- Speisewasser- und Einspritzwassereigenschaften (Druck, Temperatur),
- Zustand (Druck, Temperatur) und Massenstrom der kalten Zwischenüberhitzerdampfströme,
- Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Unterdruck am Kesselende.

Zustandsgrößen und Eigenschaften gelten an der Systemgrenze (siehe Abschnitt 6.1).

3.2 Gegenstand

Der Gegenstand des Abnahmeversuchs ist der Nachweis, daß die Gewährleistungen erfüllt sind.

Diese Gewährleistungen sind in der Hauptsache:

- die höchste Nutzwärme- bzw. Dampfleistung,
- der Zustand des erzeugten Frisch- und Zwischendampfes (Druck und Temperatur),
- der Wirkungsgrad oder Einzelverluste bzw. die Abgastemperatur.

Weiter kann Gegenstand einer Gewährleistung sein, z. B.:

- der Wirkungsgrad oder die Einzelverluste bei bestimmten Brennstoffen und Teillasten,
- der Dampfzustand bei bestimmten Brennstoffen und Teillasten,
- der Druckverlust im HD-Teil des Dampferzeugers und im Zwischenüberhitzer,
- der Druckverlust im Verbrennungsluft- und Rauchgasstrom an vereinbarten Stellen,
- das Luftverhältnis an vereinbarten Stellen,
- der maximale Durchsatz des Einspritzwassers im Zwischenüberhitzer,
- das Unverbrannte im Flugstaub.

Die Gewährleistungen beziehen sich auf den Beharungszustand, wenn nicht ausdrücklich etwas anderes vereinbart ist.

3.3 Messungen zur allgemeinen Beurteilung der Anlage

Zur allgemeinen Beurteilung der Anlage können noch weitere Größen gemessen werden, z. B.:

- Druck und Temperatur des Wassers und Dampfes an verschiedenen Stellen,
- Druck, Temperatur und Geschwindigkeit der Luft an verschiedenen Stellen des Luftweges,
- Druck, Temperatur, Geschwindigkeit und Zusammensetzung des Rauchgases an verschiedenen Stellen des Rauchgasweges.

3.4 Beteiligung verschiedener Firmen an der Lieferung

Werden einzelne Teile des Dampferzeugers von verschiedenen Firmen geliefert, so können besondere, zusätzliche Messungen erforderlich werden für den Nachweis, daß die Gewährleistungen dieser Firmen erfüllt sind.

4 Versuchsvoraussetzungen und Versuchsbedingungen

4.1 Methoden der Wirkungsgradbestimmung

Der Wirkungsgrad eines Dampferzeugers kann auf zweifache Weise bestimmt werden.

Direkte Methode

Der Wirkungsgrad wird ermittelt als das Verhältnis der vom Wasser und Dampf aufgenommenen Energie zu der Energie, die in der gleichen Zeit dem Dampferzeuger durch den Brennstoff, die Luft usw. zugeführt wird.

Indirekte Methode

Der Wirkungsgrad wird über die Verluste des Dampferzeugers ermittelt. Die zusätzliche Ermittlung der wesentlichen Verlustglieder ist auch bei der direkten Methode zu empfehlen.

Beide Methoden sind physikalisch gleichwertig. Entscheidend für die Auswahl der Methode sind die Meßmöglichkeiten. Große Brennstoffmassenströme können z. B. bei festen Brennstoffen nicht oder nur sehr schwer und ungenau gemessen werden, so daß in diesem Fall nur die „Indirekte Methode“ in Frage kommt. Die „Indirekte Methode“ sollte man auch anwenden, wenn die Brennstoffeigenschaften stark schwanken. Bei Gas- oder Heizölfeuerungen kann der Brennstoffstrom in der Regel genau gemessen werden. Dann ist insbesondere bei kleinen Dampferzeugern wegen der Unsicherheit des Strahlungs- und Leitungsverlustes die „Direkte Methode“ unter Umständen besser.

Beide Methoden unterscheiden sich auch durch die Meßunsicherheiten. Es sollte stets die Methode angewendet werden, die die kleinste Meßunsicherheit ergibt.

4.2 Versuchsbedingungen

Abnahmeversuche sollten unter den festgelegten Voraussetzungen (siehe Abschnitt 3.1) durchgeführt werden. Wenn die Betriebsverhältnisse dies nicht ermöglichen, können die Versuche nach vorheriger Vereinbarung auch unter anderen Versuchsbedingungen durchgeführt werden. Die Abweichungen sollten jedoch möglichst klein gehalten werden. Der Wirkungsgrad muß dann auf die Gewährleistungsbedingungen umgerechnet werden. Entsprechende Hinweise enthält der Abschnitt 8.

4.3 Vorversuche

Dem Lieferer ist vor dem Abnahmeversuch Gelegenheit zu Vorversuchen zu geben. Um die Meßanordnungen prüfen zu können und das Versuchspersonal einzuweisen, kann vor dem Hauptabnahmeversuch ein Vorabnahmeversuch durchgeführt werden. Falls alle Beteiligten einverstanden sind, kann dieser Vorabnahmeversuch bei einwandfreiem Ergebnis nachträglich als Hauptabnahmeversuch anerkannt werden.

4.4 Zustand des Dampferzeugers

Man kann davon ausgehen, daß ein Dampferzeuger so ausgelegt ist, daß er auch bei einer gewissen Verschmutzung die gewährleisteten Werte erreicht. Die Rohre müssen daher bei einem Abnahmeversuch nicht absolut frei von jedem Flugstaub oder Ruß sein. In der Regel soll der Abnahmeversuch unmittelbar im Anschluß an den Probebetrieb stattfinden. Ist der Dampferzeuger Liefermäßig mit Reinigungseinrichtungen ausgestattet wie z. B. mit Rußbläsern oder einer Kugelregen-Reinigungsanlage, so sollen diese in der Betriebszeit vor dem Abnahmeversuch betätigt werden.

Ist aus betriebsmäßigen Gründen erst zu einem späteren Zeitpunkt der Abnahmeversuch möglich, so muß dem Lieferer Gelegenheit gegeben werden, sich von dem Zustand der Heizflächen zu überzeugen. Umfang und Art etwaiger Reinigungsmaßnahmen vor dem Abnahmeversuch müssen dann in gegenseitigem Einvernehmen zwischen Lieferer und Betreiber vereinbart werden.

4.5 Beharrungszustand

4.5.1 Erreichen des Beharrungszustandes

Da sich die gewährleisteten Werte nur auf den Beharrungszustand beziehen, muß bei einem Abnahmeversuch sichergestellt sein, daß sich der Dampferzeuger in Beharrung befindet.

Die Zeit für die Erreichung des Beharrungszustandes hängt sehr wesentlich von der Kesselkonstruktion ab. Im allgemeinen soll der Dampferzeuger vor dem Versuch mehrere Tage durchlaufend in Betrieb gewesen sein.

Vor Versuchsbeginn muß Beharrung erreicht worden sein. Der Beharrungszustand ist einvernehmlich durch beide Parteien festzustellen.

Bei bestimmten Feuerungsarten kann aber die Zeit für das Erreichen eines Beharrungszustandes sehr groß sein (z. B. Schmelzkammerfeuerungen, Wirbelschichtfeuerungen).

4.5.2 Prüfung des Beharrungszustandes

Während des Versuches soll durch die laufende Beobachtung besonders charakteristischer und wichtiger Meßwerte geprüft werden, ob der Beharrungszustand noch besteht. Bei direkter Wirkungsgradbestimmung sind Zwischenauswertungen empfehlenswert.

4.5.3 Einstellung der Feuerung

Der Versuchsbrennstoff soll bereits so früh vor dem Versuch zugeführt werden, daß der Lieferer genügend Zeit hat, die Feuerung einzustellen, und daß auch hinsichtlich des Brennstoffes ein Beharrungszustand erreicht wird.

4.6 Versuchsdurchführung

4.6.1 Versuchsdauer

Bei der „Direkten Methode“ wird die Versuchsdauer durch die Art des Kessels und der Feuerung sowie durch die erzielbaren Meßunsicherheiten bestimmt. Die Versuchsdauer kann daher zwischen 2 und 6 Stunden liegen.

Bei der „Indirekten Methode“ wird die Versuchsdauer meist durch die Netzmessungen für den Abgasverlust oder bei einer Wirbelschicht-Feuerung durch die Ermittlung des Verlustes durch die Enthalpie und das Unverbrannte der Asche bestimmt. Die Versuchsdauer kann daher zwischen 1 und 6 Stunden liegen.

4.6.2 Zustand zu Beginn und Ende des Versuches

Zu Beginn und Ende des Versuches sollen hinreichend übereinstimmen:

Wasserstand und Dampfdruck,

Dampf- und Speisewasserstrom sowie möglichst auch Feuerungsverhältnisse,

Druckverlust über der Wirbelschicht als Maß für den Inertmaterialgehalt.

Bei Rostfeuerungen soll vor allem bei der direkten Methode der Wirkungsgradbestimmung der Brennstoffvorrat auf dem Rost am Anfang und Ende des Versuches gleich sein. Bei mechanischen Rosten sollen außerdem die mittlere Rostgeschwindigkeit und die Schichthöhe mindestens während der Dauer eines Durchlaufes des Brennstoffvorrates auf dem Rost am Beginn und Ende des Versuches gleich sein.

Die Meßzeit sollte größer als die eigentliche Versuchsdauer sein. Es empfiehlt sich, vor Versuchsbeginn und nach dessen Abschluß, insbesondere die oben genannten Meßwerte aufzunehmen, um den Beharrungszustand sicher feststellen zu können.

4.6.3 Zeitabstände der Ablesungen, Ablese-Intervalle

Die Ablese-Intervalle sind so zu wählen, daß der Integrationsfehler (siehe VDI 2048, Abschnitt 4.1.2.2, Ausgabe 06.78) möglichst vernachlässigbar klein wird.

Dies ist durch automatisch registrierende Meßwerterfassungsanlagen sichergestellt. Um dies auch bei manueller Erfassung zu erreichen, sollen die folgenden Ablese-Intervalle eingehalten werden:

Durchflußmessung	3 min
Rauchgasanalysen	5 min
Druck- und Temperaturmessung	10 min
Probenahme	15 min

Insgesamt sollen für die Versuchszeit mindestens 30 Meßwerte für jede Meßgröße vorliegen. Diese Angaben gelten nicht für die Netzmessung.

4.6.4 Zulässige Schwankungen

Dampferzeuger

Betriebsbedingte Schwankungen des Dampfdurchsatzes dürfen höchstens 3 bis 10% der Versuchsmittelwerte (jedoch nicht über die höchste Dauerleistung) betragen (siehe Bild 1). Maximal zulässige Druckschwankungen sind in Bild 2 aufgetragen. Werden diese Grenzwerte überschritten, so kann der Versuch abgelehnt werden.

Heißwassererzeuger

Bei dem Abnahmeversuch eines Heißwasserkessels kann die Situation vorliegen, daß Nutzleistung des Kessels größer oder kleiner ist als die Energie, die im Heizsystem abgeführt wird. Dies hat eine langsame Erhöhung bzw. Erniedrigung der mittleren Heißwassertemperatur und damit auch eine Änderung der mittleren Wassertemperatur im Heißwasserkessel zur Folge. Bei der Nutzwärme muß daher auch ein instationärer Anteil berücksichtigt werden, der sich aus dem Wasserinhalt und der Kesselmasse berechnen läßt. Da diese Rechnung aber mit Unsicherheiten verbunden ist, sollte die maximale Temperaturänderung je Stunde folgenden Wert nicht überschreiten:

$$\frac{\Delta t_z}{z} < \left| 0,03 \frac{\dot{V} (t_2 - t_1)}{1,15 V_K} \right| \frac{K}{h} \quad (1)$$

Darin ist:

$\dot{V}$	der beim Abnahmeversuch gemessene Wasservolumenstrom	m^3/h
V_K	der Wasserinhalt des Heißwasserkessels	m^3
t_1	die mittlere Eintrittstemperatur während des Versuches $t_1 = 0,5 (t_{1E} + t_{1A})$	$^{\circ}\text{C}$
t_2	die mittlere Austrittstemperatur während des Versuches $t_2 = 0,5 (t_{2E} + t_{2A})$	$^{\circ}\text{C}$
z	Versuchszeit	h
Δt_z	Änderung der mittleren Heißwassertemperatur in der Versuchszeit	$^{\circ}\text{C}$
	$\Delta t_z = t_{mE} - t_{mA} = 0,5 ((t_{1E} + t_{2E}) - (t_{1A} + t_{2A}))$	$^{\circ}\text{C}$

Index A Beginn des Versuches

Index E Ende des Versuches

Ist der Temperaturanstieg größer, kann der Abnahmeversuch abgelehnt werden.

4.7 Sonstige Hinweise

Es muß sichergestellt sein, daß auf der Wasser-/Dampfseite nirgends durch Undichtheiten in den Leitungen und Absperrvorrichtungen oder durch Nebenströme Fehler in den Massenstrombestimmungen auftreten können. Unbenutzte Leitungen sollen daher mit Blindflanschen versehen werden; ist dies nicht durchführbar, so muß eine ständige Überwachung möglich sein.

Während des Versuches sollte nicht abgeschlämmt oder entsalzt werden. Ist dies nicht zu vermeiden, so ist das

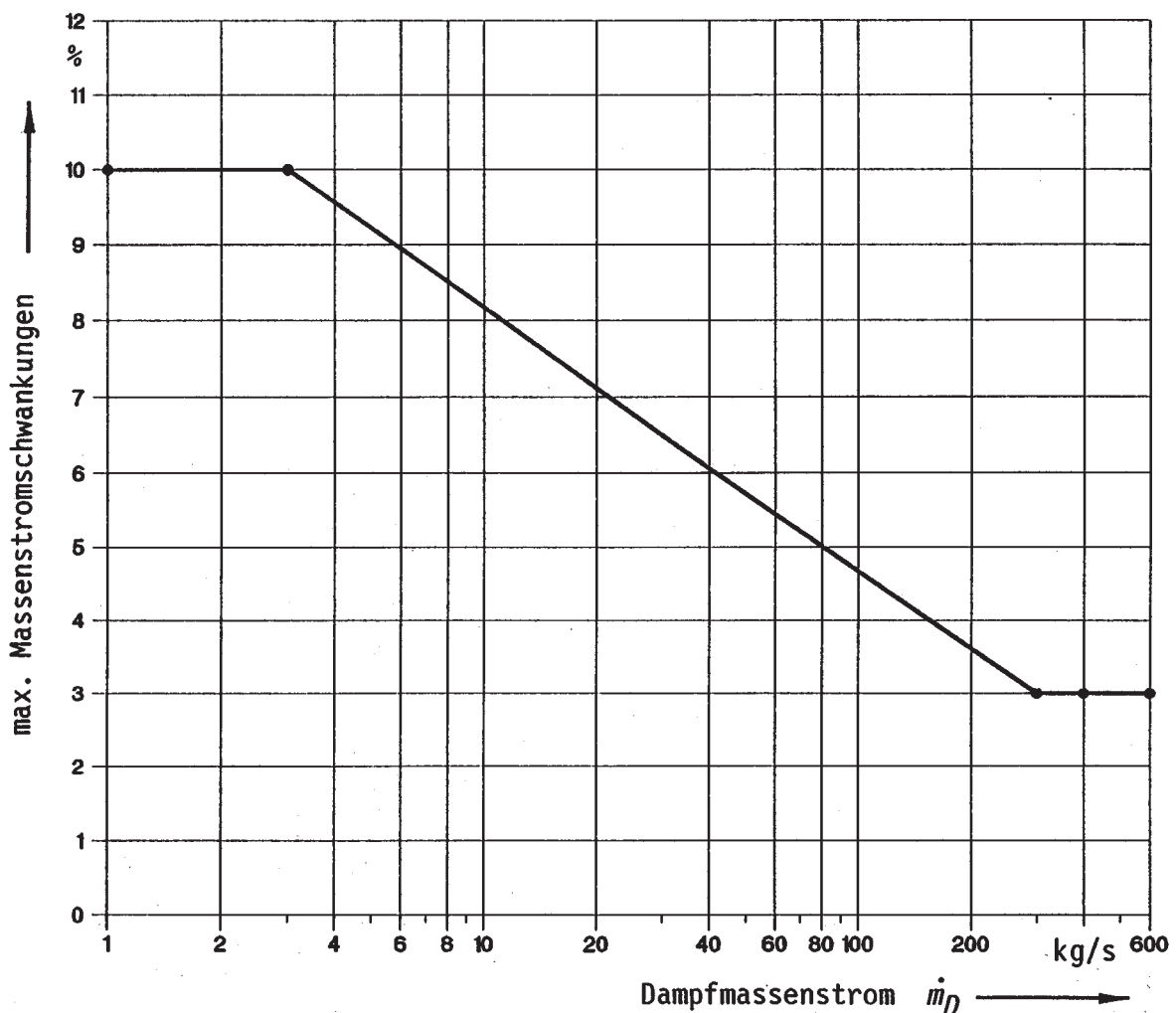


Bild 1: Maximale zulässige Schwankungen des Dampfmassenstromes

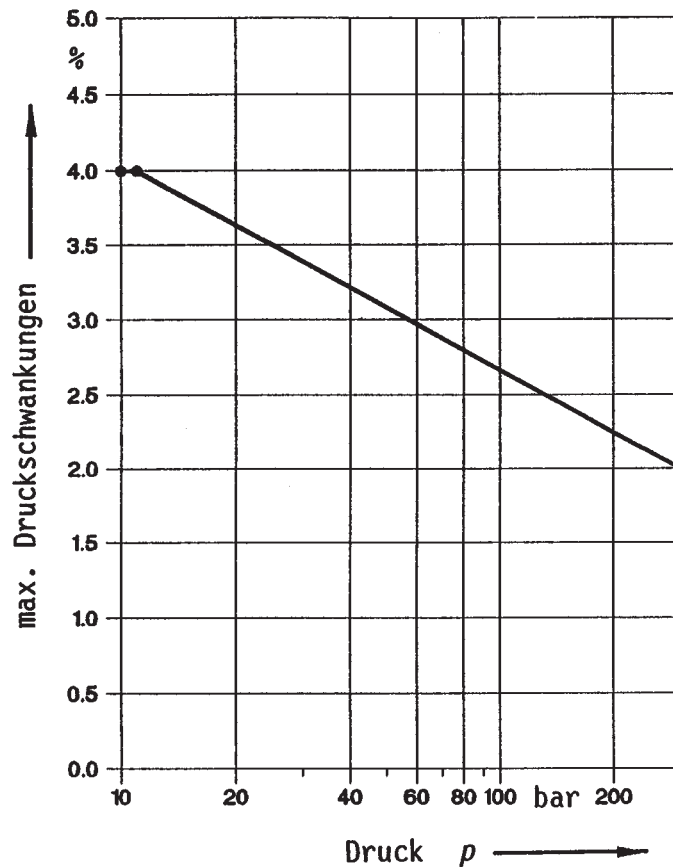


Bild 2: Maximale zulässige Schwankungen des Dampfdruckes

Volumen des abgelassenen Kesselwassers zu bestimmen. Die vom abgelassenen Wasser im Dampferzeuger aufgenommene Wärme ist der Nutzleistung des Dampferzeugers zuzurechnen, falls nichts anderes vereinbart ist. Rußblasen soll während des Versuches, wenn irgend möglich, unterbleiben.

5 Meßgeräte und Meßverfahren

5.1 Allgemeine Bemerkungen

Nur solche Meßgeräte bzw. Meßumformer dürfen verwendet werden, deren Anzeige- bzw. Ausgangswerte sich einwandfrei nachprüfen lassen und deren Grenzabweichungen bekannt sind.

Hierzu gehören:

- Meßgeräte, für die das Eichzeugnis einer anerkannten Behörde vorgelegt wird,
- eichfähige Meßgeräte, die durch Vergleich mit geeichten Meßgeräten nach a), möglichst unter Versuchsbedingungen, kalibriert worden sind, und zwar vor und nach dem Versuch in beiden Richtungen,
- genormte Meßgeräte mit bekannten Grenzabweichungen,
- andere bewährte Meßgeräte mit bekannten Grenzabweichungen, deren Verwendung zwischen den Vertragspartnern vereinbart wird.

Die Meßeinrichtungen dürfen während des Versuches keine nennenswerten bleibenden Änderungen erfahren.

Die Ablesung kann analog oder digital erfolgen und manuell oder automatisch aufgenommen werden. Im Bericht sind die verwendeten Meßgeräte und ihre Grenzabweichungen anzugeben.

Werden die einzelnen Meßwerte mittels einer automatischen Datenverarbeitungsanlage registriert, so ist durch Stichproben die richtige Verarbeitung der Meßsignale zu überprüfen.

5.2 Drücke und Differenzdrücke

Zur Messung von Drücken sollen geeignete und auf den jeweiligen Meßwert abgestimmte Druckmeßgeräte bzw. Druckmeßumformer eingesetzt werden. Druckdifferenzen sollten möglichst direkt und mit geeigneten Differenzdruckmeßgeräten wie z. B. U-Rohre, Schrägrohr-Mikromanometer oder Differenzdruckmeßumformer gemessen werden. Als Sperrflüssigkeit dienen Quecksilber, Wasser oder Flüssigkeiten geeigneter Dichte. Hinweise zu Meßanordnungen findet man in der VDI/VDE 3512 Blatt 3.

Vor und nach dem Versuch sind die Druckmeßgeräte für steigenden und fallenden Druck zu kalibrieren. Weitere Empfehlungen für die Druckmessungen bei Luft und anderen Gasen nach VDI 2045 Blatt 1 (z. Z. Entwurf) und VDI 2044.

5.3 Temperatur

Zur Temperaturmessung sollen Präzisionsgeräte nach Abschnitt 5.1 a) und b), z. B. Flüssigkeitsthermometer, Thermoelemente und Widerstandsthermometer, letztere in Verbindung mit geeigneten Meßschaltungen bzw. Meßumformern, verwendet werden.

Entsprechende Empfehlungen nach den Unterlagen VDI/VDE 3511 sowie VDI/VDE 3512 Blatt 2.

Wenn bei Messungen in großen Querschnitten unterschiedliche Temperaturen an verschiedenen Stellen des gleichen Querschnitts zur selben Zeit ermittelt werden, so ist zu prüfen, ob diese Temperaturunterschiede tragbar

sind. Andernfalls ist der Temperatur-Mittelwert durch Netzmessung zu bestimmen. Dazu ist der Meßquerschnitt in eine Anzahl gleicher Teilquerschnitte aufzuteilen. Dabei ist darauf zu achten, daß Meßquerschnitte keine Quer- und Rückströmungen aufweisen. Angaben findet man dazu in VDI 2044, VDI 2066 Blatt 1 und VDI/VDE 2640 Blatt 3 und Blatt 4. Als Mittelwert wird im allgemeinen das arithmetische Mittel der gemessenen Temperaturen eingesetzt. In Sonderfällen kann vereinbart werden, daß auch Geschwindigkeit bzw. Wirkdruck gemessen und das gewogene Mittel eingesetzt wird. Der Einfluß von Unterschieden der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität ist gering und kann vernachlässigt werden.

5.4 Masse und Massenstrom

5.4.1 Wägung

Die zur Gewichtsbestimmung benutzten Waagen sind vor dem Versuch zu prüfen und müssen den Eichvorschriften genügen.

Nach der Anlage zur Eichordnung, Eichfehlergrenzen von Waagen, 12. August 1988 (veröffentlicht im Bundesgesetzblatt, Teil 1, Z 5702 A, Nr. 43, vom 26. August 1988) betragen die Eichfehlergrenzen für:

Dezimalwaagen: 0,5 g für jedes kg der Belastung, jedoch nicht weniger als ein Fünftel der Fehlergrenze für die Höchstlast. Die Verkehrsfehlergrenze beträgt das Doppelte der Eichfehlergrenze.

Gleiswaagen: 3 bis 4 g für jedes kg der Belastung. Die Verkehrsfehlergrenze beträgt das 1,5fache der Eichfehlergrenze.

Seilzugwaagen bei Wägung des vollen und entleerten Kübels: 1 bis 2 g für jedes kg der Belastung, jedoch nicht weniger als die Hälfte der Fehlergrenze für die Höchstlast. Die Verkehrsfehlergrenze beträgt das 1,5fache der Eichfehlergrenze.

Becherwerk-, Förderband-, Kipp- und Federwaagen sind zugelassen, wenn sie vor und nach dem Versuch durch Wägung geförderter Mengen bei etwa gleicher Förderleistung geprüft werden.

5.4.2 Volumenstrommessung

Die Volumenstrommessung wird mittels Volumenzähler vorgenommen, für den vor und gegebenenfalls nach dem Versuch die Kalibrierkurve zu kontrollieren ist. Hinter Kolbenpumpen sind nur echte Volumenzähler (keine Flügelradmesser) zulässig. Auf die Einhaltung des gleichen spezifischen Volumens bzw. der gleichen Dichte während der Versuchsdauer ist zu achten.

Die Volumenbestimmung kann auch mit Behältern erfolgen, die durch Auffüllen aus amtlich geeichten Gefäßen, durch sorgfältiges Abmessen, oder mit gewogenem Wasser geprüft wurden.

Bei etwaigen Unterschieden der Flüssigkeitstemperatur zum Zeitpunkt der Prüfung bzw. des Versuches gegenüber der Eichtemperatur sind die Dichteänderungen der Flüssigkeit und die Wärmedehnung des Meßbehälters zu berücksichtigen. (Das Volumen eines Stahlbehälters vergrößert sich z. B. bei einer Erwärmung um 100 K um etwa 0,4%).

5.4.3 Durchflußmessung

5.4.3.1 Durchflußmessung mit Blenden und Düsen

Bei der Durchflußmessung mit Blenden und Düsen ist nach DIN 1952 zu verfahren.

Bei Dampferzeugern großer Leistung ist es oft unvermeidbar, daß die in DIN 1952 festgelegten Anwendungsbereiche überschritten werden. In diesen Fällen sind VDI/VDE 2040 Blatt 1 (z. Z. Entwurf) und VDI/VDE 2040 Blatt 5 anzuwenden.

Weitere Hinweise nach VDI/VDE 2040 Blatt 2 bis Blatt 4, VDI/VDE 2041 und VDI/VDE 3512 Blatt 1.

Werden zur Durchflußmessung Einschweiß-Drosselgeräte verwendet, so sind folgende Hinweise zu beachten:

Da vor dem Abnahmeversuch eine Messung oder Prüfung der geometrischen Größen nicht möglich ist, muß dies vor der Montage (Einschweißen) durchgeführt und in einem Protokoll dokumentiert werden. Bezüglich der Einlaufstörung gilt DIN 1952.

Werden Durchflußmeßumformer verwendet, so ist die Betriebscharakteristik unter Versuchsbedingungen vor dem Versuch festzustellen bzw. eine Kalibrierkurve aufzustellen.

5.4.3.2 Durchflußmessung mit Geschwindigkeitssonden

Bei der Durchflußmessung mit Geschwindigkeitssonden (Staurohr oder Anemometer) ist nach VDI 2045 Blatt 1 (z. Z. Entwurf) bzw. VDI 2044 zu verfahren.

5.4.4 Staubmassenstrommessung

Wenn eine Messung des Staubmassenstromes in einem bestimmten Querschnitt notwendig ist, so ist die Meßmethode zu vereinbaren. Hinweise dazu enthalten VDI 2066 Blatt 1 bis Blatt 6.

5.4.5 Dichtebestimmung

Zur Bestimmung des Massenstromes wird die Dichte mit den gemessenen Zustandsgrößen (Druck, Temperatur) und der Zusammensetzung aus einschlägigen Tabellen entnommen.

Bei Gasen unbestimmter Zusammensetzung ist die Dichte mit einem Gasdichtemesser (z. B. nach „Bunsen-Schilling“) nach DIN 51870 zu bestimmen.

5.5 Heizwert

5.5.1 Heizwert der Brennstoffe

Brennwert (H_o) und Heizwert (H_u) fester und flüssiger Brennstoffe sind nach DIN 51900 Teil 1 und Teil 2 oder Teil 3 zu bestimmen. Bei Gasen mit bekannter und unveränderlicher Zusammensetzung können aufgrund einer Gasanalyse der Brennwert und der Heizwert rechnerisch nach DIN 51850 bestimmt werden. Bei einigen gasförmigen Brennstoffen (Erd- und Raffineriegase) kann die Bestimmung des Heizwertes über die Analyse zu Unsicherheiten führen, wenn z. B. geringe Anteile schwerer Kohlenwasserstoffe bei der Gasanalyse nicht erfaßt werden. In diesen Fällen sind der Brennwert und der Heizwert fortlaufend mittels Handkalorimeter zu bestimmen. Außerdem ist die Verwendung eichfähiger automatischer Kalorimeter zur Bestimmung des Brennwertes zulässig.

5.5.2 Probenahme von Brennstoffen

Die Probenahme und Probenvorbereitung fester Brennstoffe ist nach DIN 51701 Teil 2, Teil 3 und Teil 4 durchzuführen.

Die Probenahme flüssiger Brennstoffe ist nach DIN 51750 Teil 1 und Teil 2 und die gasförmiger Brennstoffe nach DIN 51853 durchzuführen. Sie muß der Art, Zusammensetzung und Qualität des während des Versuches verfeuerten Brennstoffes entsprechen. Dies gilt besonders für Brennstoffe mit schwankender Zusammensetzung. Proben sind in der Zusammensetzung zu entnehmen, die derjenigen am Eintritt in die Bilanzhülle entspricht.

5.5.3 Heizwert und Probenahme der Verbrennungsrückstände

Der Heizwert der Verbrennungsrückstände für die Berechnung des Feuerungsverlustes durch Unverbranntes wird nach DIN 51900 Teil 1 und Teil 2 oder Teil 3 bestimmt.

Eine vereinfachte Bestimmung des Heizwertes über den Kohlenstoffgehalt oder über den Glühverlust kann vereinbart werden.

Wird keine Bestimmung des Heizwertes vereinbart, so sind als Heizwert des Unverbrannten die Werte des Abschnittes 2.2 einzusetzen.

Unter Verbrennungsrückständen werden die in lockeren Zustand (Flugstaub) oder in flüssiger bzw. zusammengesetzter fester Form (Schlacke) anfallenden Rückstände verstanden, einschließlich des darin enthaltenen Brennstoffes.

Die Probenahme der Verbrennungsrückstände erfolgt wie bei den festen Brennstoffen nach DIN 51701 Teil 2, Teil 3 und Teil 4. Werden die Verbrennungsrückstände naß gewogen, ist dafür zu sorgen, daß der Wassergehalt der Probe dem mittleren Wassergehalt der Rückstände entspricht.

Soll die Bestimmung des anfallenden Verbrennungsrückstandes zur Ermittlung des Wirkungsgrades nach der indirekten Methode dienen, so wird empfohlen, die festgestellte Menge im Rahmen einer Aschebilanz zu prüfen.

5.6 Chemische Zusammensetzung

5.6.1 Brennstoffe

Bei Bedarf kann die elementare Zusammensetzung von festen und flüssigen Brennstoffen nach DIN 51700, DIN 51718 bis DIN 51721 und DIN 51724 Teil 1 und Teil 2 sowie die von gasförmigen Brennstoffen mittels Gasanalyse bestimmt werden.

5.6.2 Flugstaub und Asche

Vom Flugstaub und von der Schlacke muß bei der indirekten Wirkungsgradbestimmung für die Berechnung der Verluste jeweils das Unverbrannte bestimmt werden. Über die Art der Bestimmung muß eine Vereinbarung getroffen werden; dies gilt besonders für das Unverbrannte in der Asche von Wirbelschicht-Feuerungen. Wichtig ist dabei die Höhe der Prüftemperatur. Hinweise sind DIN 51721 zu entnehmen.

5.6.3 Rauchgas

Die Zusammensetzung des Rauchgases kann sowohl mit Hilfe von chemischen, physikalisch-chemischen oder rein physikalisch arbeitenden Analysegeräten, die sowohl diskontinuierlich als auch kontinuierlich arbeiten, bestimmt werden.

Die Geräte müssen so bemessen sein, daß der Streubereich der Meßwerte unter Berücksichtigung einer statistischen Sicherheit von $P = 95\%$ (beidseitig) folgenden Werten entspricht:

Kohlenstoffdioxid $\pm 0,2\%$ Punkte

Sauerstoff $\pm 0,15\%$ Punkte

Volumenkonzentration des Kohlenstoffmonoxid $\pm 1\%$ vom Meßbereichsendwert, aber nicht kleiner als $\pm 0,01\%$ Punkte.

Bei Einsatz automatisch arbeitender Gasanalysatoren ist während der Versuchszeit die vor Beginn des Versuches vorgenommene Einstellung des Nullpunktes und der Empfindlichkeit, z.B. durch Aufgabe von Prüfgasen, zu kontrollieren.

Bei der CO_2 -Messung ist zu beachten, daß bei den chemisch arbeitenden Analysegeräten der CO_2 - und SO_2 -Gehalt, bezogen auf trockenes Rauchgas, gemessen wird.

Die Raumtemperatur bzw. die Umgebungstemperatur im Bereich des Meßwertgebers soll möglichst konstant gehalten werden. Für die Netzmessungen gilt sinngemäß Abschnitt 5.3.

5.7 Elektrische Leistung

Die Ermittlung der aufgenommenen Leistung der elektrischen Antriebe soll mit Eichzählern oder mit Leistungsmessungen nach der 3- oder 2-Wattmeter-Methode vorgenommen werden. Für die Ermittlung der abgegebenen Leistung sind von der Lieferfirma Wirkungsgradkurven der Motoren beizustellen.

6 Energiebilanz und Wirkungsgrad

6.1 Energiebilanz, Systemgrenze

6.1.1 Allgemeines

Die wichtigste Bedingung für die Berechnung des Wirkungsgrades ist die Festlegung des Bilanzraumes, über den sich die Energiebilanz des Dampferzeugers erstrecken soll.

Die Grenze des Bilanzraumes (Systemgrenze) soll sich einmal mit der Liefergrenze decken, zum anderen müssen die für die Ermittlung des Wirkungsgrades wichtigen Energieströme eindeutig meßbar sein. Ist eine einwandfreie Messung an der Liefergrenze nicht möglich, so kann die Systemgrenze in gegenseitigem Einvernehmen in einen günstigeren Meßquerschnitt verlegt werden, wobei u. U. eine Umrechnung einzelner Meßwerte auf die Liefergrenze notwendig werden kann.

Bild 3 zeigt das Schema eines Dampferzeugers. In dieses Schema ist die Systemgrenze mit allen zu- und abgeführten Massen- und Energieströmen eingetragen. Dabei werden diese Ströme aus den über die Versuchszeit gemessenen Werten ermittelt.

6.1.2 Normal-System

Dieses System umfaßt das gesamte Dampf-Wasser-System mit den vorhandenen Umwälzpumpen, die Feuerung einschließlich der Mahlanlage bei einer Kohlenstaubfeuerung, das Rauchgasumwälzgebläse, die Flugstaubrückführung und den Kalorifer. In diesem System sind nicht enthalten eine Öl- oder Gasvorwärmung, der Entstauber, das Frischluft- und das Rauchgasgebläse. Dieses System soll im Normalfall dem Abnahmeversuch zugrunde gelegt werden. Findet bei dieser Systemgrenze eine Rückführung des Flugstaubes statt, so müßte nach der Definition der zu- und abgeführten Energien der Enthalpiestrom des Flugstaubes vor dem Entstauber als Verlustwärme und der Enthalpiestrom des rückgeführten Flugstaubes als zugeführte Energie eingesetzt werden. Dieses Verfahren, wenn auch formal richtig, wäre etwas sinnwidrig. Da die Temperatur des rückgeführten Staubes aber praktisch nur sehr wenig von der Abgastemperatur abweichen wird, sollte stets so verfahren werden, daß man sich den rückgeführten Flugstaub vor dem Entstauber, d. h. noch innerhalb der Systemgrenze abgeschieden denkt, so daß die Rückführung immer innerhalb der Systemgrenze erfolgt. Kann man diese Annahme nicht machen, so muß der Entstauber in die Systemgrenze mit einbezogen werden (siehe Abschnitt 6.1.3.4).

6.1.3 Weitere Systeme

6.1.3.1 Allgemeines

Aus meßtechnischen Gründen, einem entsprechenden Lieferumfang oder anderen Überlegungen kann es zweckmäßig sein, andere Grenzen als das Normal-System der Energiebilanz beim Abnahmeversuch zugrunde zu legen. Wird von dieser Möglichkeit Gebrauch gemacht, so muß in jedem konkreten Fall festgelegt werden, welche Energieströme zusätzlich bei den unter Abschnitt 6.3 aufgeführten Energien zu berücksichtigen sind. Von den Möglichkeiten sollen in den folgenden Abschnitten einige Beispiele aufgeführt werden.

6.1.3.2 System ohne Kalorifer

Dieses System unterscheidet sich von dem Normal-System nur dadurch, daß der Kalorifer außerhalb der Systemgrenze liegt. Es entspricht exakt dem im ANSI-Power-Test-Code vorgeschriebenen Bilanzraum (siehe Bild 4).

Wird in diesem Fall der Kalorifer mit Fremddampf beheizt, so kommt die Leistung in der Energiebilanz nicht vor. Sie ist nur indirekt enthalten, da der Enthalpiestrom der Verbrennungsluft um die Leistung des Kalorifers höher ist. Wird der Kalorifer dagegen mit Eigendampf beheizt, so soll die Leistung des Kalorifers zur Nutzwärme gezählt werden (siehe Abschnitt 6.3.1).

6.1.3.3 System mit Frischluftgebläse

Dieses System wird sinnvoll angewendet, wenn zwischen dem Frischluftgebläse und dem Luvo kein geeigneter Meßquerschnitt vorhanden ist oder wenn mit Heißluft-rückführung gearbeitet wird, da dann die Messung des Heißluftstromes entfällt. Bei den zugeführten Energien muß in diesem Fall die Wellenleistung des Frischluftgebläses mit berücksichtigt werden (siehe Bild 3, strichpunktierte Grenze).

6.1.3.4 System mit Entstauber bzw. mit Entstauber und Rauchgasgebläse

Dieses System kann in Frage kommen, wenn sich im Rauchgaskanal vor dem Entstauber bzw. bis zum Rauchgasgebläse keine geeignete Meßebe für das Abgas finden läßt. In diesen Fällen kommen als weitere Energien die elektrische Leistung eines Elektrofilters (P_{En}) und die Wärmeverluste des Entstaubers (Q_{En}) bzw. zusätzlich die Wellenleistung des Rauchgasgebläses (P_G) hinzu. Über die Höhe der Energien des Entstaubers muß vor dem Versuch eine Vereinbarung getroffen werden, solange darüber keine allgemeinen Erfahrungswerte vorliegen. Bei diesen Systemgrenzen muß die gemessene Abgastemperatur auf die den Gewährleistungen zugrundeliegende Systemgrenze zurückgerechnet werden.

6.1.3.5 System mit einer Brüdenabscheidung an der Mahlanlage

Bei Braunkohlen, die einen relativ hohen Wassergehalt haben, ist unter Umständen eine Brüdenabscheidung an der Mühle notwendig, d. h. der beim Mahltrocknungsprozess entstandene Wasserdampf wird nur zum Teil in den Dampferzeuger geführt. In diesem Fall muß die Brüdenabscheidung mit in den Bilanzraum einbezogen werden. Das gleiche gilt für die bei einem derartigen Prozeß notwendige Rauchgasrückführung vom Kesselende, d. h. auch die Entnahmestelle muß innerhalb der Systemgrenze liegen (siehe Bild 5). Ist das letztere nicht möglich, so muß man sich vorher auf gegebenenfalls notwendige Korrekturen verständigen. Bei der Brüdenabscheidung tritt als zusätzlicher Energiestrom der Abgasstrom zum Brüdenkamin auf. Sein Massenstrom, die Zusammensetzung und der Staubgehalt muß gemessen werden. Der Energiestrom gehört zu den „weiteren Verlusten“ (siehe Abschnitt 6.3.3.5).

6.1.3.6 Systeme bei integrierten

Rauchgasentschwefelungs- und Denox-Anlagen

Liegen zwischen dem Luvo und dem Dampferzeuger in dem Rauchgas- und/oder Luftweg Teile der Rauchgasentschwefelungsanlage (REA) oder die Denox-Anlage, so

ist die übliche Energiebilanz unter Einschluß des Luftvorwärmers nicht möglich. Für die Abnahme des Dampferzeugers kann man dann die Systemgrenzen nur noch sinnvoll durch die heißen Luft- und Rauchgaswege legen. In diesem Fall ist die Berechnung bzw. Gewährleistung des Wirkungsgrades nicht sehr sinnvoll. Es wird empfohlen sich auf die Gewährleistung der Rauchgasaustritts-temperatur aus dem Dampferzeuger bei einer vereinbarten Dampferzeugerleistung zu beschränken.

6.1.3.7 Sonderfälle

Für Spezial-Dampferzeuger können Systemgrenzen zweckmäßig sein, die nicht aufgeführt sind. Zu diesen Sonderfällen müssen bereits bei der Gewährleistungsabgabe im Liefervertrag die Systemgrenzen festgelegt und über die Messungen oder Berechnungen von Energieströmen, die in den Regeln nicht enthalten sind, Vereinbarungen getroffen werden.

6.2 Bezugstemperatur

Für die Berechnung der zu- und abgeführten Energien innerhalb der Energiebilanz des Dampferzeugers ist die Festlegung eines Nullniveaus notwendig. Da die Druckabhängigkeit der spezifischen Enthalpien der Stoffströme auf der Rauchgasseite bei den praktisch vorkommenden Drücken nur sehr gering ist, genügt die Festlegung einer Temperatur. Diese Bezugstemperatur t_b soll im allgemeinen bei Abnahmeversuchen mit 25°C gewählt werden.

Es kann aber auch eine andere Temperatur vereinbart werden, doch muß dann der Heizwert umgerechnet werden.

Die Umrechnung erfolgt nach Gleichung 1b:

$$H_{ub} = H_u + [c_{Baw} (1 - \gamma_A - \gamma_{H_2O}) + \mu_{LoT} c_{pLT} - \mu_{GoT} c_{pGT} - \mu_{H_2OB} c_{pD} + \gamma_{H_2O} c_W] (t_b - 25) \quad (1b)$$

Darin sind:

H_u Heizwert bei 25°C

H_{ub} Heizwert bei der gewählten Bezugstemperatur t_b

Da die Bezugstemperaturen in einem relativ engen Temperaturbereich liegen, kann man für die integrale spezifische Wärmekapazität feste Werte einsetzen und zwar die Werte für die spezifische Wärmekapazität bei 25°C:

Wasser	$c_W = 4,19 \text{ kJ/(kg K)}$
Wasserdampf	$c_{pD} = 1,86 \text{ kJ/(kg K)}$
trockene Luft	$c_{pLT} = 1,005 \text{ kJ/(kg K)}$
trockenes Rauchgas	$c_{pGT} = 1,0 \text{ kJ/(kg K)}$

Brennstoffe:

Steinkohle	$c_{Baw} = (1 + 0,95 \gamma_{FI B}) 0,877 \text{ kJ/(kg K)}$
Braunkohle	$c_{Baw} = 1,7 \text{ kJ/(kg K)}$
Heizöl S	$c_B = 1,7 \text{ kJ/(kg K)}$
Methan	$c_B = 2,2 \text{ kJ/(kg K)}$

Da der im Abschnitt 6.4 definierte Kesselwirkungsgrad aber von der Wahl der Bezugstemperatur abhängig ist, muß eine von 25°C abweichende Temperatur bereits vor der Abgabe der Gewährleistung durch die Herstellerfirma des Dampferzeugers festgelegt werden.

Es sei noch darauf hingewiesen, daß durch die Bezugstemperatur nur ein willkürlich wählbares Energie-Nullniveau festgelegt wird. Diese Temperatur hat nichts mit der Außentemperatur zu tun.

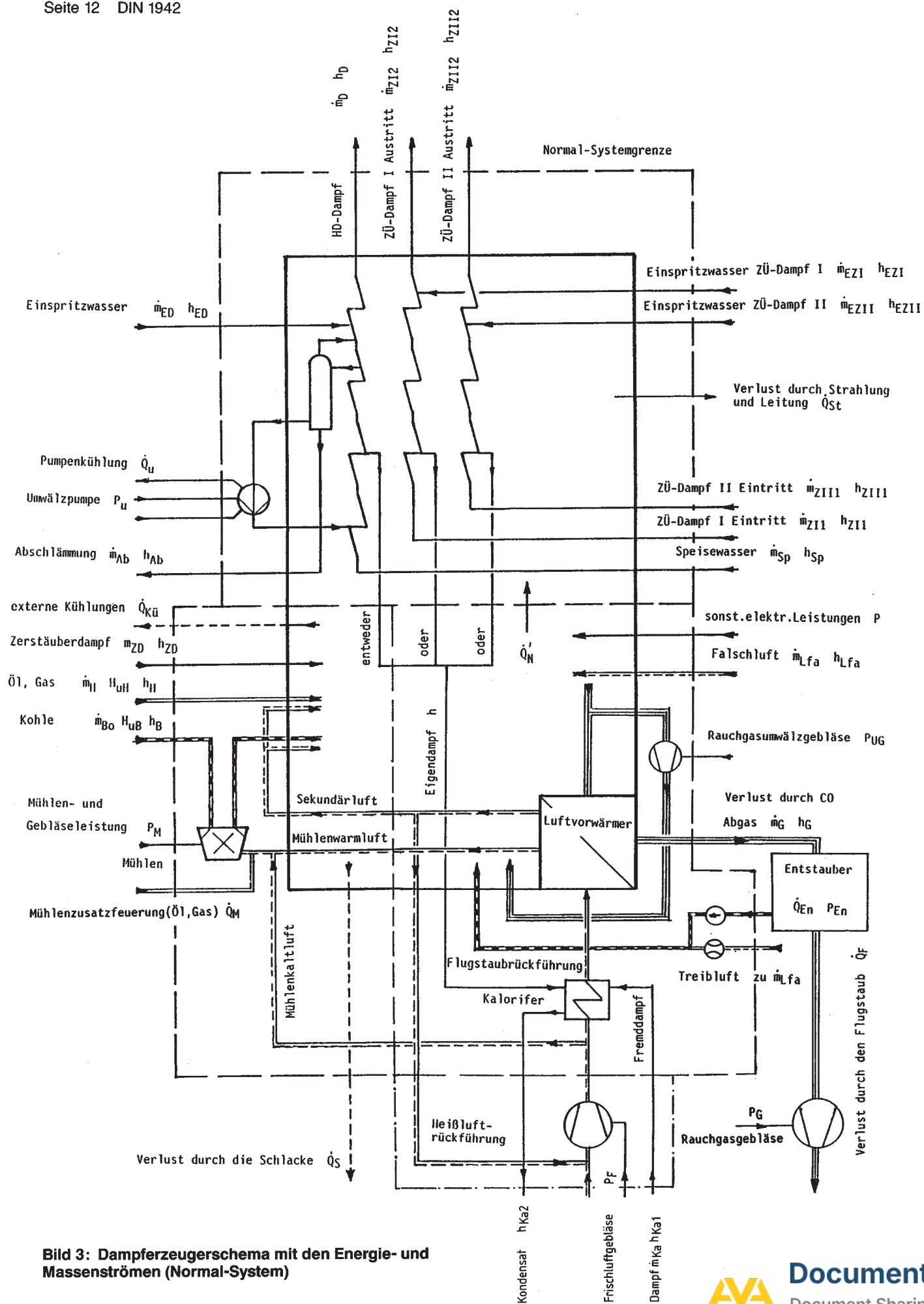


Bild 3: Dampferzeugerschema mit den Energie- und Massenströmen (Normal-System)

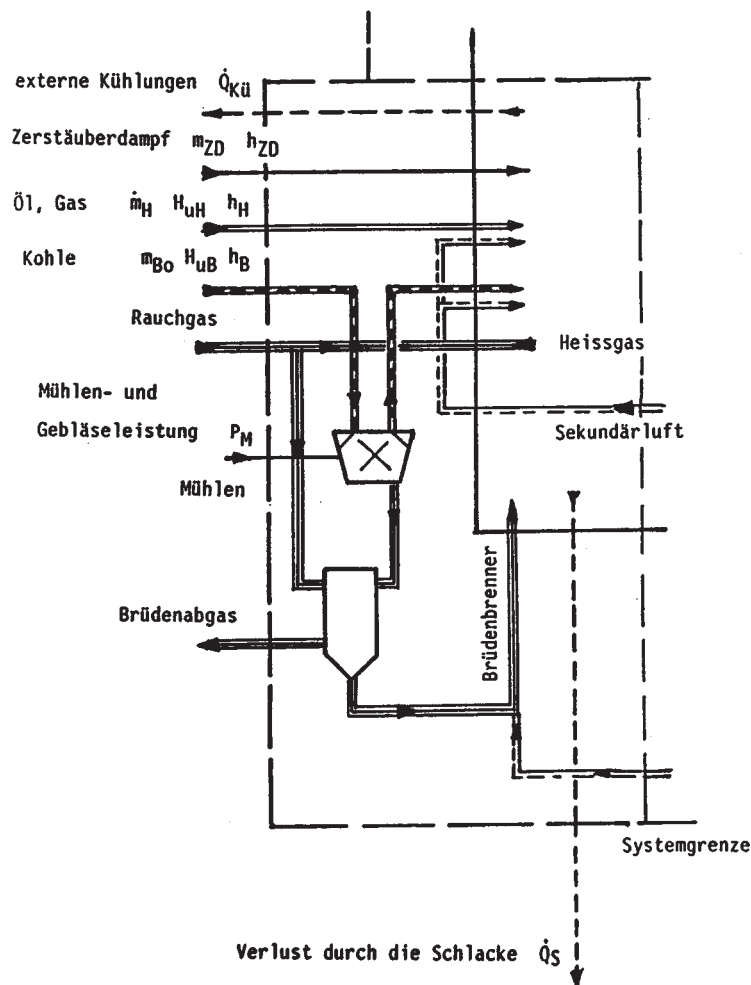


Bild 5: Dampferzeugerschema mit Energie- und Massenströmen (System mit Brüdenabscheidung)

Ist dabei der Kalorifer innerhalb der Systemgrenze (siehe Bild 3), wird:

$$\dot{Q}_{Ka} = \dot{m}_{Ka} (h - h_{Ka2}) \quad (4)$$

Für die Wirkungsgradberechnung muß $\dot{Q}_{Ka}$ als zeitbezogener Energiestrom zur Größe $\dot{Q}_Z$ hinzuaddiert werden (siehe Abschnitt 6.3.2.3).

Ist dabei der Kalorifer außerhalb der Systemgrenze (siehe Bild 4), so wird:

$$\dot{Q}_{Ka}^* = \dot{m}_{Ka} (h_{Ka1} - h) \quad (5)$$

Für die Wirkungsgradberechnung muß $\dot{Q}_{Ka}^*$ zum Nutzwärmestrom gezählt werden.

Wird der Kalorifer durch Fremddampf beheizt, so gilt Abschnitt 6.3.2.3 Gleichung (16).

In den Gleichungen ist:

- $\dot{m}_{Ka}$ der Kalorifermassenstrom
- h_{Ka1} die Enthalpie am Kalorifereintritt
- h_{Ka2} die Enthalpie des ablaufenden Kondensates
- h die Eintritts-Enthalpie in das HD- bzw. ZD-System, je nachdem aus welchem System der Eigendampf entnommen wird
- $h = h_{Sp}$ bei Heißdampf aus dem HD-System
- $h = h_{ZI1}$ bei Heißdampf aus dem ZDI-System
- $h = h_{ZII1}$ bei Heißdampf aus dem ZDII-System

Wird statt des Heißdampfstromes $\dot{m}_D$ der Speisewasserstrom $\dot{m}_{Sp}$ gemessen, so ist der Heißdampfstrom aus der Massebilanz zu bestimmen.

$\dot{m}_D = \dot{m}_{Sp} - \dot{m}_{Ab}$ wenn der Massenstrom des Einspritzwassers $\dot{m}_{ED}$ hinter der Meßblende für $\dot{m}_{Sp}$ entnommen wird

$\dot{m}_D = \dot{m}_{Sp} - \dot{m}_{Ab} + \dot{m}_{ED}$ wenn der Massenstrom des Einspritzwassers $\dot{m}_{ED}$ vor der Meßblende für $\dot{m}_{Sp}$ entnommen wird

Die Durchflußmessung nach Abschnitt 5.4.3.1 führt bei Einspritzwasserströmen häufig zu unbrauchbaren Ergebnissen, da die Blenden bzw. Düsen nicht für die Bedingungen des Abnahmeversuches ausgelegt werden können. In diesen Fällen können die Einspritzwasserströme über die Energie- und Massebilanz der Kühler bestimmt werden. Voraussetzung ist, daß die Temperaturen und Drücke vor und nach Kühler gemessen werden, und daß die Verdampfung des Einspritzwassers bis zur Meßstelle nach Kühler abgeschlossen ist.

$$\dot{m}_E = \dot{m}_{D1} (h_{D1} - h_{D2}) / (h_{D2} - h_E) \quad (6)$$

oder

$$\dot{m}_E = \dot{m}_{D2} (h_{D1} - h_{D2}) / (h_{D1} - h_E) \quad (7)$$

Darin ist:

- h_{D1} Enthalpie des Dampfes vor Kühler
- h_{D2} Enthalpie des Dampfes nach Kühler
- $\dot{m}_{D1}$ Dampfmassenstrom vor Kühler
- $\dot{m}_{D2}$ Dampfmassenstrom nach Kühler

Wird der Zwischendampfstrom nicht nach Abschnitt 5.4.3.1 gemessen, so kann er aus dem Heißdampfstrom unter Abzug der gemessenen oder berechneten Anzapfströme für die HD-Vorwärmer sowie der berechneten, gemessenen oder geschätzten Wellendichtungsströme der HD-Turbine nach DIN 1943 bestimmt werden.

Für Heißwasserkessel gilt:

$$\dot{Q}_{N,sta} = \dot{m} (h_2 - h_1)$$

Darin sind:

$\dot{m}$ Massenstrom des Heizwassers

h_1 Enthalpie bei der mittleren Eintrittstemperatur t_1

h_2 Enthalpie bei der mittleren Austrittstemperatur t_2

Ändert sich während der Abnahmeversuchszeit eines Heißwasserkessels die mittlere Wassertemperatur, so muß neben der stationären Nutzwärme ein instationärer Anteil berücksichtigt werden. Es ist:

$$\dot{Q}_N = \dot{Q}_{N,sta} (1 + f) = \dot{Q}_{N,sta} k_N$$

mit $f = \frac{V_K}{\dot{V}} \cdot \frac{1,15}{t_2 - t_1} \cdot \frac{\Delta t_z}{z}$ (8)

Darin sind:

$\dot{Q}_{N,sta}$ stationäre Nutzwärme

k_N Korrekturfaktor für die Nutzwärme zur Berücksichtigung eines instationären Anteiles

Weitere Formelzeichen siehe Abschnitt 4.6.4.

Für Wärmeträgeranlagen gilt analog:

$$\dot{Q}_N = \dot{m} (h_2 - h_1) \quad (9)$$

Darin sind:

$\dot{m}$ Massenstrom des Wärmeträgers

h_1 Enthalpie am Eintritt

h_2 Enthalpie am Austritt

6.3.2 Zugeführte Energieströme

6.3.2.1 Allgemeines

Die Erläuterungen und Gleichungen der Abschnitte 6.3.2 bis 6.3.4 gelten für Abnahmeversuche, bei denen nur ein Brennstoff im Dampferzeuger verfeuert wird. Bei der direkten Wirkungsgradbestimmung muß dieser Brennstoffstrom gemessen werden. Im Gegensatz dazu kann man bei der indirekten Wirkungsgradbestimmung auf die Messung des Brennstoffstromes verzichten. Zur Berechnung des Wirkungsgrades muß man dann aber bei den zugeführten Energieströmen zwischen den Energieströmen unterscheiden, die dem Massenstrom des verbrannten Brennstoffes proportional sind, und denen, die ihm nicht proportional sind.

Werden Abnahmeversuche durchgeführt, bei denen im Dampferzeuger zwei oder mehr Brennstoffe gleichzeitig verfeuert werden, so sind die Erläuterungen und Gleichungen des Abschnittes 6.3.6 zu beachten.

6.3.2.2 Dem verbrannten Brennstoff proportional zugeführte Energieströme

Zu dieser Gruppe gehört die Energie des Brennstoffes, seiner Zerstäubungshilfsmittel (Dampf, Luft) und der Verbrennungsluft.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ZB} &= \dot{m}_B [(H_u + h_B + \mu_{ZD}) / (1 - l_u) + J_L] \\ &= \dot{m}_B H_{uges} \end{aligned} \quad (10)$$

Darin sind:

$\dot{m}_B$ der Massenstrom des verbrannten Brennstoffes

H_u der Heizwert des Brennstoffes bei der Bezugstemperatur t_b

h_B die Enthalpie des Brennstoffes

$$h_B = \bar{c}_B (t_B - t_b) \quad (11)$$

l_u das Verhältnis des unverbrannten zum zugeführten Brennstoffstrom

$$l_u = \dot{m}_{Bu} / \dot{m}_{Bo} \text{ (siehe Abschnitt 6.3.3.4)}$$

J_L die Enthalpie der bezogenen Verbrennungsluftmasse des Brennstoffes

$$J_L = \mu_L \bar{c}_{pL} (t_L - t_b) \quad (12)$$

μ_L bezogene Verbrennungsluftmasse

t_L Lufttemperatur an der Bilanzgrenze

μ_{ZD} die Zerstäuber Dampf- bzw. -luftmasse je kg Brennstoff

h_{ZD} die Enthalpie des Zerstäuber Dampfes

$h_o(t_b)$ die Enthalpie des Zerstäuber Dampfes nach den Wasserdampf Tafeln für $p \rightarrow 0$ bei der Bezugstemperatur (siehe Tabelle 1)

Bei Fremddampf ist:

$$h_{ZD} = h_{ZD,WDt} - h_o(t_b) \quad (13 a)$$

$h_{ZD,WDt}$ die Enthalpie des Zerstäuber Dampfes nach den Wasserdampf Tafeln

Bei Eigendampf, d.h. wenn der Zerstäuber Dampf unmittelbar dem Dampferzeuger entnommen und durch Drosseln und Einspritzkühlung auf den gewünschten Zustand $h_{ZD,WDt}$ gebracht wird, ist:

$$h_{ZD} = h_{Sp,WDt} - h_o(t_b) \quad (13 b)$$

$h_{Sp,WDt}$ die Enthalpie des Speisewassers nach den Wasserdampf Tafeln

Liegt die Lufttemperatur t_L wesentlich über der Temperatur t_{fa} , mit der die Falschlufte in den Dampferzeuger tritt, wobei die Treibluft einer Flugstaubrückführungsanlage mit zur Falschlufte zu zählen ist, und ist der Falschlufteanteil x_{fa} groß, so muß dies u. U. bei der bezogenen Enthalpie J_L berücksichtigt werden. Der Korrekturfaktor für J_L ist dann:

$$z_{fa} = 1 - x_{fa} (t_L - t_{fa}) / (t_L - t_b) \quad (14)$$

6.3.2.3 Brennstoffstromunabhängige zugeführte (zeitbezogene) Energieströme

Zu den zugeführten Energieströmen, die dem verbrannten Brennstoff nicht proportional sind, gehören die Wellenleistungen der Mühlen, des Rauchgasumwälzgebläses, der Umwälzpumpen und der sonstigen Motoren, wie Luvoantrieb, Schleufluftgebläse, Flugstaubrückführung. Weiter muß zu dieser Gruppe die Leistung des Kalorifers gezählt werden, wenn sich der Kalorifer innerhalb der Systemgrenze befindet. Dabei muß man noch unterscheiden, ob der Kalorifer durch Fremddampf ($\dot{Q}_{Ka}$ Gleichung 15 a) oder ob er durch Eigendampf ($\dot{Q}_{Ka}^*$ Gleichung 15 b) beheizt wird.

Tabelle 1:

Spezifische Enthalpie h_o des Dampfes für $p \rightarrow 0$ nach den Wasserdampf Tafeln in Abhängigkeit von der Temperatur

t	0	5	10	15	20	25	30	35	40	°C
h_o	2501,78	2511,04	2520,31	2529,59	2538,88	2548,18	2557,48	2566,79	2576,11	kJ/kg

