

Verein Deutscher
Zementwerke e.V.



4 Düsseldorf
Tannenstraße 2

Durchführung und Auswertung von Drehofenversuchen

Ausschuß
Verfahrenstechnik

Arbeitskreis
Ofenversuche

Inhalt	Seite
1. Vorbemerkung	5
2. Beschreibung des Klinkerbrennprozesses	6
2.1 Brenngutreaktionen	6
2.2 Brennverfahren	7
3. Durchführung von Ofenversuchen	10
3.1 Betriebsweise der Ofenanlage	10
3.2 Versuchsdauer	10
3.3 Meßverfahren	10
3.3.1 Feststoffe	10
3.3.1.1 Probenahme	10
3.3.1.2 Analyse	10
3.3.1.3 Massenströme	15
3.3.2 Gase	15
3.3.2.1 Probenahme	15
3.3.2.2 Analyse	16
3.3.2.3 Volumenströme	16
3.3.3 Flüssigkeiten	16
3.3.3.1 Heizöl	16
3.3.3.2 Wasser	16
3.3.4 Temperaturen	16
3.3.5 Drücke	17
3.3.6 Schub- und Drehzahlen	17
3.3.7 Elektrischer Energieverbrauch	17
3.3.8 Umgebungszustände	18
3.3.9 Sicherstellung der Meß- und Analysengenauigkeit	18
4. Auswertung von Ofenversuchen	19
4.1 Bilanzierung der Gesamtanlage	19
4.1.1 Feststoffmassenströme	21
4.1.2 Gasvolumenströme	22
4.1.2.1 Trockenes Gas	22
4.1.2.1.1 Mindestluftvolumenstrom	22
4.1.2.1.2 Luftverhältniszahl	23
4.1.2.1.3 Falschluf am Ofenkopf	24
4.1.2.1.4 Sekundärluft	24
4.1.2.1.5 Kühlerzuluf	24
4.1.2.1.6 Rohgas	24
4.1.2.1.7 Gas nach Brennbereich	25
4.1.2.1.8 Gas nach Drehofen (Ofeneinlauf)	25
4.1.2.2 Wasserdampf	25
4.1.2.2.1 Feuchte der Luft	25
4.1.2.2.2 Wasser aus dem Brenngut	26
4.1.2.2.3 Wasser aus dem Brennstoff	26
4.1.2.2.4 Einspritzwasser	26
4.1.2.3 Feuchtes Gas	26
4.1.2.3.1 Luft	26
4.1.2.3.2 Rohgas	26
4.1.3 Flüssigkeitsmassenströme	26
4.1.4 Energieströme	26
4.1.4.1 Energieeinnahmen	26
4.1.4.1.1 Brennstoff	26
4.1.4.1.2 Aufgabegut	28
4.1.4.1.3 Luft	28
4.1.4.1.4 Einspritzwasser	30
4.1.4.1.5 Mechanische Leistung	30
4.1.4.2 Energieausgaben	31
4.1.4.2.1 Reaktionsenthalpie des Brennguts	31
4.1.4.2.1.1 C ₃ S, C ₂ S, C ₃ A und C ₄ AF im Klinker	31

Vervielfältigungen und Auszüge nur mit Genehmigung des Vereins Deutscher Zementwerke e.V.



Durchführung und Auswertung von Drehofenversuchen

Inhalt	Seite
1. Vorbemerkung	5
2. Beschreibung des Klinkerbrennprozesses	6
2.1 Brenngutreaktionen	6
2.2 Brennverfahren	7
3. Durchführung von Ofenversuchen	10
3.1 Betriebsweise der Ofenanlage	10
3.2 Versuchsdauer	10
3.3 Meßverfahren	10
3.3.1 Feststoffe	10
3.3.1.1 Probenahme	10
3.3.1.2 Analyse	10
3.3.1.3 Massenströme	15
3.3.2 Gase	15
3.3.2.1 Probenahme	15
3.3.2.2 Analyse	16
3.3.2.3 Volumenströme	16
3.3.3 Flüssigkeiten	16
3.3.3.1 Heizöl	16
3.3.3.2 Wasser	16
3.3.4 Temperaturen	16
3.3.5 Drücke	17
3.3.6 Schub- und Drehzahlen	17
3.3.7 Elektrischer Energieverbrauch	17
3.3.8 Umgebungszustände	18
3.3.9 Sicherstellung der Meß- und Analysengenauigkeit	18
4. Auswertung von Ofenversuchen	19
4.1 Bilanzierung der Gesamtanlage	19
4.1.1 Feststoffmassenströme	21
4.1.2 Gasvolumenströme	22
4.1.2.1 Trockenes Gas	22
4.1.2.1.1 Mindestluftvolumenstrom	22
4.1.2.1.2 Luftverhältniszahl	23
4.1.2.1.3 Falschluf am Ofenkopf	24
4.1.2.1.4 Sekundärluft	24
4.1.2.1.5 Kühlerzuluft	24
4.1.2.1.6 Rohgas	24
4.1.2.1.7 Gas nach Brennbereich	25
4.1.2.1.8 Gas nach Drehofen (Ofeneinlauf)	25
4.1.2.2 Wasserdampf	25
4.1.2.2.1 Feuchte der Luft	25
4.1.2.2.2 Wasser aus dem Brenngut	26
4.1.2.2.3 Wasser aus dem Brennstoff	26
4.1.2.2.4 Einspritzwasser	26
4.1.2.3 Feuchtes Gas	26
4.1.2.3.1 Luft	26
4.1.2.3.2 Rohgas	26
4.1.3 Flüssigkeitsmassenströme	26
4.1.4 Energieströme	26
4.1.4.1 Energieeinnahmen	26
4.1.4.1.1 Brennstoff	26
4.1.4.1.2 Aufgabegut	28
4.1.4.1.3 Luft	28
4.1.4.1.4 Einspritzwasser	30
4.1.4.1.5 Mechanische Leistung	30
4.1.4.2 Energieausgaben	31
4.1.4.2.1 Reaktionsenthalpie des Brennguts	31
4.1.4.2.1.1 C_3S , C_2S , C_3A und C_4AF im Klinker	31



Durchführung und Auswertung von Drehofenversuchen

Inhalt (Fortsetzung)	Seite
4.1.4.2.1.2 CaCO_3 und MgCO_3 im Aufgabegut und Rohgasstaub.	32
4.1.4.2.1.3 CaCO_3 und C_2S im Bypassstaub	32
4.1.4.2.1.4 Bilanzgleichungen	32
4.1.4.2.2 Wasserverdampfen	34
4.1.4.2.3 Abgasverluste	34
4.1.4.2.4 Staubverluste	34
4.1.4.2.5 Unvollständige Verbrennung	34
4.1.4.2.6 Klinker	35
4.1.4.2.7 Strahlung und Konvektion	35
4.1.4.2.8 Ausgekoppelte Wärme	37
4.1.4.3 Energiebilanz.	37
4.2 Bilanzierung der Teilanlagen	37
4.2.1 Klinkerkühler	37
4.2.1.1 Feststoffmassenströme	39
4.2.1.2 Gasvolumenströme	39
4.2.1.3 Energieströme	39
4.2.1.3.1 Energieeinnahmen	39
4.2.1.3.1.1 Heißklinker	39
4.2.1.3.1.2 Kühlerzuluft.	39
4.2.1.3.1.3 Einspritzwasser.	39
4.2.1.3.1.4 Mechanische Leistung	40
4.2.1.3.2 Energieausgaben	40
4.2.1.3.2.1 Klinker, Klinkerstaub	40
4.2.1.3.2.2 Strahlung und Konvektion	40
4.2.1.3.2.3 Ausgekoppelte Wärme.	40
4.2.1.3.2.4 Kühlerabluft, Sekundärluft, Tertiärluft	40
4.2.1.3.2.5 Wasserverdampfen.	40
4.2.1.3.3 Energiebilanz	40
4.2.1.4 Beurteilungsgrößen	40
4.2.1.4.1 Vorkühlzone	40
4.2.1.4.2 Energieverluststrom des Kühlbereichs	41
4.2.1.4.3 Kühlbereichswirkungsgrad.	41
4.2.1.4.4 Kühlerwirkungsgrade.	41
4.2.2 Calcinator (nur bei Ofenanlagen mit Zyklonvorwärmer)	41
4.2.2.1 Bestimmung des Vorentsäuerungsgrads.	42
4.2.3 Vorwärmer (nur bei Ofenanlagen mit Zyklonvorwärmer)	43
4.2.3.1 Abscheidegrad einzelner Zyklonstufen	43
5. Beurteilung der Stoffkreisläufe.	45
6. Beurteilung des Zementklinkers	46
6.1 Brenngrad	46
6.2 Korngrößenverteilung.	46
6.3 Mahlbarkeit	46
6.4 Chemische Zusammensetzung	46
6.5 Phasenzusammensetzung	47
6.6 Mikroskopische Untersuchung.	47
6.7 Zementprüfungen.	47
7. Beurteilung der Emissionen.	48
8. Formelzeichen und Indizes	49
9. Schrifttum	53
9.1 Allgemeines Schrifttum.	53
9.2 Spezielles Schrifttum	53



Durchführung und Auswertung von Drehofenversuchen

Inhalt (Fortsetzung)	Seite
10. Auswertebeispiel 1 (Ofenanlage mit Zyklonvorwärmer, Calcinator und Tertiärluftleitung)	56
10.1 Bilanzierung der Gesamtanlage	56
10.1.1 Feststoffmassenströme	56
10.1.2 Gasvolumenströme	56
10.1.2.1 Trockenes Gas	56
10.1.2.1.1 Mindestluftvolumenstrom	56
10.1.2.1.2 Luftverhältniszahlen	56
10.1.2.1.3 Falschluff am Ofenkopf	57
10.1.2.1.4 Sekundärluft	57
10.1.2.1.5 Kühlerzuluft	57
10.1.2.1.6 Rohgas	57
10.1.2.1.7 Gas nach Brennbereich	58
10.1.2.1.8 Gas nach Drehofen (Ofeneinlauf)	58
10.1.2.1.9 Falschluff (Vorwärmer)	59
10.1.2.1.10 Falschluff (Calcinator)	59
10.1.2.2 Wasserdampf	59
10.1.2.2.1 Feuchte der Luft	59
10.1.2.2.2 Wasser aus dem Brenngut	60
10.1.2.2.3 Wasser aus dem Brennstoff	60
10.1.2.2.4 Einspritzwasser	60
10.1.2.3 Feuchtes Gas (Beispiele)	60
10.1.3 Flüssigkeitsmassenströme	60
10.1.4 Energieströme	60
10.1.4.1 Energieeinnahmen	60
10.1.4.1.1 Brennstoff	60
10.1.4.1.2 Aufgabegut	61
10.1.4.1.3 Luft	61
10.1.4.1.4 Einspritzwasser	61
10.1.4.1.5 Mechanische Leistung	61
10.1.4.2 Energieausgaben	61
10.1.4.2.1 Reaktionsenthalpie des Brennguts	61
10.1.4.2.1.1 C_3S , C_2S , C_3A und C_4AF im Klinker	61
10.1.4.2.1.2 $CaCO_3$ und $MgCO_3$ im Aufgabegut und Rohgasstaub	62
10.1.4.2.1.3 $CaCO_3$ und C_2S im Bypassstaub	62
10.1.4.2.1.4 Bilanzgleichungen	62
10.1.4.2.2 Wasserverdampfen	63
10.1.4.2.3 Abgasverluste	63
10.1.4.2.4 Staubverluste	63
10.1.4.2.5 Unvollständige Verbrennung	64
10.1.4.2.6 Klinker	64
10.1.4.2.7 Strahlung und Konvektion	64
10.1.4.2.8 Ausgekoppelte Wärme	64
10.1.4.3 Energiebilanz	64
10.2 Bilanzierung der Teilanlagen	64
10.2.1 Klinkerkühler	64
10.2.1.1 Feststoffmassenströme	64
10.2.1.2 Gasvolumenströme	65
10.2.1.3 Energieströme	65
10.2.1.3.1 Energieeinnahmen	65
10.2.1.3.2 Energieausgaben	65
10.2.1.3.3 Energiebilanz	66
10.2.1.4 Beurteilungsgrößen	66
10.2.1.4.1 Vorkühlzone	66
10.2.1.4.2 Energieverluststrom des Kühlbereichs	66
10.2.1.4.3 Kühlbereichswirkungsgrad	66
10.2.2 Calcinator	67
10.2.3 Vorwärmer	67
10.3 Fehlerabschätzung	67
10.4 Tabellen	68



Durchführung und Auswertung von Drehofenversuchen

Inhalt (Fortsetzung)	Seite
11. Auswertbeispiel 2 (Ofenanlage mit Rostvorwärmer)	73
11.1 Bilanzierung der Gesamtanlage.	73
11.1.1 Feststoffmassenströme.	73
11.1.2 Gasvolumenströme.	73
11.1.2.1 Trockenes Gas	73
11.1.2.1.1 Mindestluftvolumenstrom	73
11.1.2.1.2 Luftverhältniszahlen.	73
11.1.2.1.3 Falschluf am Ofenkopf	74
11.1.2.1.4 Sekundärluft.	74
11.1.2.1.5 Kühlerzuluft	74
11.1.2.1.6 Rohgas.	74
11.1.2.1.7 Schlupf (Heißkammer/Trockenkammer)	75
11.1.2.1.8 Gas nach Drehofen (Ofeneinlauf)	75
11.1.2.1.9 Falschluf (Vorwärmer)	76
11.1.2.2 Wasserdampf	76
11.1.2.2.1 Feuchte der Luft.	76
11.1.2.2.2 Wasser aus dem Brenngut	76
11.1.2.2.3 Wasser aus dem Brennstoff	77
11.1.2.2.4 Einspritzwasser (Granulierwasser).	77
11.1.2.3 Feuchtes Gas (Beispiele).	77
11.1.3 Flüssigkeitsmassenströme.	77
11.1.4 Energieströme	77
11.1.4.1 Energieeinnahmen	77
11.1.4.1.1 Brennstoff	77
11.1.4.1.2 Aufgabegut (Granalien)	78
11.1.4.1.3 Luft	78
11.1.4.1.4 Einspritzwasser	78
11.1.4.1.5 Mechanische Leistung	78
11.1.4.2 Energieausgaben	78
11.1.4.2.1 Reaktionsenthalpie des Brennguts.	78
11.1.4.2.1.1 C_3S , C_2S , C_3A und C_4AF im Klinker	78
11.1.4.2.1.2 $CaCO_3$ und $MgCO_3$ im Aufgabegut und Rohgasstaub	79
11.1.4.2.1.3 $CaCO_3$ und C_2S im Zyklonstaub	79
11.1.4.2.1.4 Bilanzgleichungen.	79
11.1.4.2.2 Wasserverdampfen	80
11.1.4.2.3 Abgasverluste	80
11.1.4.2.4 Staubverluste	80
11.1.4.2.5 Unvollständige Verbrennung	81
11.1.4.2.6 Klinker	81
11.1.4.2.7 Strahlung und Konvektion	81
11.1.4.2.8 Ausgekoppelte Wärme	81
11.1.4.3 Energiebilanz	81
11.2 Bilanzierung der Teilanlagen	81
11.2.1 Klinkerkühler	81
11.2.1.1 Feststoffmassenströme.	81
11.2.1.2 Gasvolumenströme	82
11.2.1.3 Energieströme.	82
11.2.1.3.1 Energieeinnahmen	82
11.2.1.3.2 Energieausgaben	82
11.2.1.3.3 Energiebilanz	82
11.2.1.4 Beurteilungsgrößen.	83
11.2.1.4.1 Vorkühlzone	83
11.2.1.4.2 Energieverluststrom des Kühlbereichs	83
11.2.1.4.3 Kühlbereichswirkungsgrad	83
11.2.2 Heißkammer	83
11.3 Tabellen.	84

1. Vorbemerkung

Ofenversuche dienen in Zementwerken nicht nur dazu, die Leistungsdaten der Ofenanlage (Klinkerleistung, spez. Brennstoffenergieverbrauch) zu erfassen, sondern auch eine zuverlässige Grundlage für die Optimierung einzelner Anlagenteile, des Betriebs und der Zementqualität sowie für die Minderung der Emissionen zu schaffen. Dabei kommt es auf den Absolutwert der Meßwerte an. Das Merkblatt enthält deshalb neben der Auswertung insbesondere auch Angaben zur Durchführung von Versuchen einschließlich wesentlicher Hinweise zur Meßtechnik.

Zahlenwertgleichungen gelten mit den in Kapitel 8 angegebenen Dimensionen. Bei der Formulierung der Zahlenwertgleichungen steht die praktische Durchführbarkeit der Auswertung im Vordergrund. Die Auswertgleichungen werden in den Kapiteln 10 und 11 an zwei Beispielen praktisch angewendet.

Behandelt werden hauptsächlich Energie- und Stoffbilanzen. Angaben zu Drücken, Schub- und Drehzahlen sowie zum elektrischen Energieverbrauch dienen demgegenüber nur der Beurteilung des Ofenbetriebs. Für eine genaue Messung wären hier zusätzliche Angaben erforderlich.