

DK 53.08:621-53:621-55:666.1.031.2/.6

## Meß- und Regeltechnik in Glashütten

### I. Erfassung von Meß- und Regelgrößen

VON PAUL WEBER-KLEIN, Mainz

(Eingegangen am 20. Dezember 1958)

An Hand des vorliegenden Schrifttums und auf Grund eigener Erfahrungen wird versucht, die Problematik der Messung und Regelung an Glasschmelzöfen aufzuzeigen. Insbesondere werden Gesichtspunkte für den Einsatz und Auswahl von Geräten erörtert.

Die wirtschaftlichen und technologischen Vorteile, die sich aus dem Einsatz von Meß- und Regelgeräten an fast allen Ofen- und Maschineneinheiten der Glasindustrie ergeben, sind durch viele Erfahrungen und Veröffentlichungen so bekannt, daß sie hier nicht nochmals aufgezählt werden müssen. Bei der Planung neuer Produktionseinheiten und besonders bei der Überprüfung vorhandener Anlagen hinsichtlich Verbesserung ihrer Wirtschaftlichkeit bestehen daher weniger Zweifel über die Notwendigkeit von Meß- und Regeleinrichtungen als über deren Auswahl und Einsatz. Das Angebot an solchen Geräten ist in den letzten Jahren derart vielfältig und differenziert geworden, daß es einer eingehenden Beschäftigung mit diesem verhältnismäßig jungen Zweig der Technik bedarf, um Fehlinvestitionen und Enttäuschungen zu vermeiden; zumal außer der rein technischen Zweckmäßigkeit auch die Einfügung in die vorhandene Geräteausstattung berücksichtigt werden muß, um Wartung und Lagerhaltung in erträglichen Grenzen zu halten. Es erscheint daher wünschenswert, unter Hinweis auf vorliegende Veröffentlichungen und Erfahrungen Richtlinien darüber aufzustellen,

1: Welche Meßgrößen zuverlässig und wirtschaftlich erfaßt, und welche davon durch Regeleinrichtungen konstant gehalten werden können.

2: Welche Geräte für den beabsichtigten Zweck hinreichend genau, zuverlässig und einfach sind.

3: Welche Anordnung und Zusammenfassung der Geräte einer Einheit vorteilhaft ist.

Die wichtigsten Meßgrößen zur Führung und Überwachung von Glasschmelzöfen sind Temperaturen, Brennstoff- und Luftmengen, Brennstoff-Luftverhältnis, Abgaszusammensetzung, Herdraumdruck, Abgaszug, Glasstand und verschiedene Drucke.

### 1. Temperaturen

#### 1.1. Schmelzwannen

Zur Führung eines Glasschmelzofens interessieren die Temperaturen an folgenden Stellen: Gewölbelängsachse und Seitenwände, Glasbad in Längs- und Querrichtung und an verschiedenen Stellen des Wannenbodens, Glasbad entlang der Speiserrinne, ferner in Regeneratorkammern, Abgaszügen und an Steinoberflächen.

Zur Messung der Temperaturen in der Schmelzwanne selbst benutzt man heute in Europa überwiegend Thermoelemente in der Gewölbelängsachse. Werden sie richtig eingebaut, so ist ihre Lebensdauer mit 6–12 Monaten befriedigend. Über bewährte Ausführungen, Anordnungen und Einbauarten von Thermoelementen wurde vielfach berichtet [1]. Besonders sei hier auf das Edelmetallthermopaar Pt 18 zur Messung hoher Tempe-

raturen hingewiesen. Die erforderliche Anzahl richtet sich nach der Größe der Wanne, jedoch sollten möglichst nicht weniger als drei Meßstellen, und zwar am Einlegeende, in der Läuterzone und in der Arbeitswanne vorgesehen werden, um den Schmelzvorgang ausreichend überwachen zu können. Größere Einheiten erhalten zweckmäßigerweise zusätzliche Thermoelemente zwischen den Brennern und in Brücken- bzw. Durchlaßnähe. Wegen der beschränkten Lebensdauer der Thermoelemente hat man besonders im Ausland vielfach versucht, die Gewölbetemperatur mit Strahlungspyrometern zu messen [1]. Erhebliche Schwierigkeiten bereitet dabei die Abdichtung der Meßlöcher gegen austretende Abgase und Flammen, die die Gerätelinsen beschlagen oder beschädigen, falls nicht wirksame Gegenmaßnahmen getroffen sind. Im neuen Zustand der Wanne dichte Abdeckplättchen oder dgl. werden durch Angriff der Ofenatmosphäre durchlässig und können nur schwer ersetzt werden. Es sind verschiedene Anordnungsweisen bekannt geworden, die sich jedoch anscheinend nur selten bewährt haben (Bild 1) [2, 3, 4, 5].

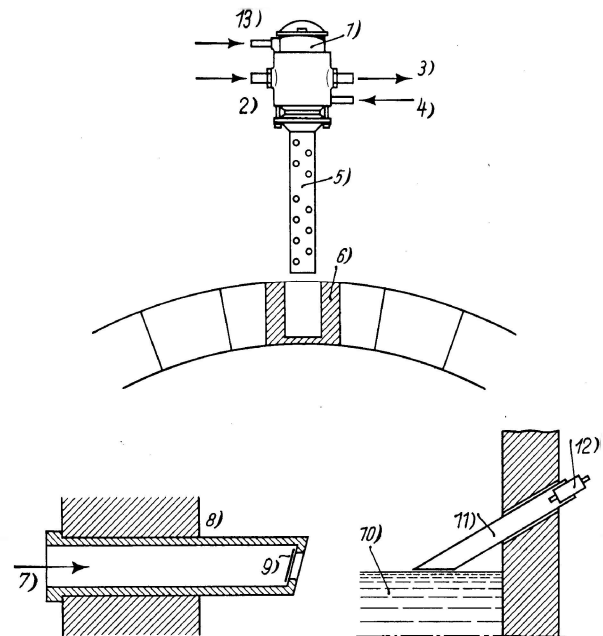


Bild 1. Einbaumöglichkeiten von Strahlungspyrometern [2, 3].  
1. Ardometergehäuse, 2. Kühlluft eintritt, 3. Kühlluft austritt, 4. Schutzluft gut gefiltert, 5. Visierrohr, 6. Formstein im Gewölbe, 7. Visiereinrichtung für Ardometer, 8. Ofenraum, 9. Glühplättchen, 10. Glasbad, 11. Schirmrohr, 12. Pyrometer, 13. Stutzen für elektr. Anschluß.

Strahlungspyrometer werden mit besserem Erfolg zur Messung der Seitenwandtemperaturen eingesetzt, da sie in diesem Falle zugänglicher und besser zu überwachen sind, und überdies der Herdraumdruck geringer

ist, so daß sich ein Verschuß des Meßloches erübrigt. Es genügt, beispielsweise einen leichten Luftstrom gegen das Loch zu richten, der die Rauchgase zurückhält (Bild 2). Gesamtstrahlungs-pyrometer sind wegen ihres

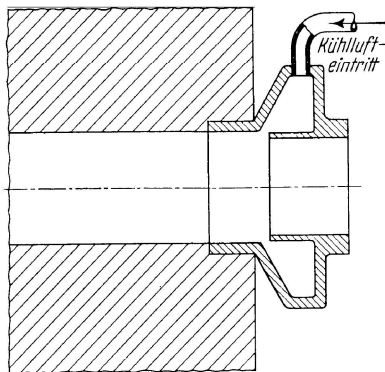


Bild 2. Pyrometer-Abschirmflansch gegen Abgasaustritt [3].

bekanntem Nachteils, Beeinflussung durch die Flammen im Ofenraum, weniger geeignet. Vorteilhafter erscheinen

Fotoelementpyrometer, die nur auf einen Teil des sichtbaren Spektrums reagieren und bei Temperaturen über 1300°C einen weit gespreizten Meßbereich erlauben [6].

Diese schnell ansprechenden Geräte eignen sich besonders auch zur Überwachung des Temperaturabfalles in den Wechseipausen. Eine Übersicht über Strahlungs-pyrometer und ihre Anwendung in Glashütten gibt Tabelle 1. Die Amerikaner bauen zuweilen die Thermoelemente in die Seitenwände ein, wobei die Meßlöcher nicht durchgebohrt sind, sondern etwa 3 cm vor der Innenwandfläche enden. Diese Art der Temperaturmessung ergibt allerdings nur relative Werte und muß mit optischen Messungen ergänzt werden.

50 mm in die Wanne ragenden Thermoelemente verhältnismäßig raschem Verschleiß ausgesetzt sind, versieht man die Spitzen mit Platinkappen, wenn man auf lange Lebensdauer Wert legt. Eine andere Ausführung, die hauptsächlich für Einbau in Wannenseitenwände geeignet ist, besteht in einem starken Schutzrohr aus Graphit (Bild 3), das durch einen wassergekühlten Kopf im Wannenstein gehalten wird [7]. Des weiteren hat man blanke Pt-Rh-Pt-Thermopaare ohne Schutzrohr zwischen Glimmerplatten in die Fugen der Wannensteine eingebaut [3]. Die Anzahl richtet sich auch hier nach Bauart und Größe der Wanne, meist sieht man jedoch Meßstellen in Nähe des Einlegevorbaues vor, unter der Läuterzone oder hinter dem Durchlaß und unter Glasentnahmestellen.

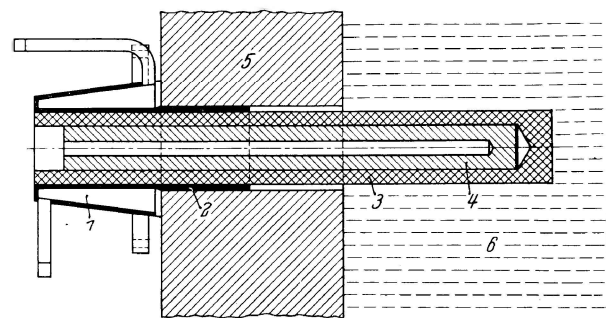


Bild 3. Graphitschutzrohr für Glasbadthermoelemente [7]. 1. Wasserkühlkasten, 2. Hitzebeständiges Schutzrohr, 3. Graphitrohr, 4. Keramikrohr, 5. Wannenstein, 6. Glasbad.

Tabelle 1. Strahlungs-pyrometer und ihre Anwendung in Glashütten

Spektralbereich [μ]	Bezeichnung und Firma	Meßobjekt			Meßbereich [°C]	Ø der anvisierten Fläche bei 4 m Abstand [cm]	Art der Anzeige					Einstellzeit [s]
		Ofen innen	Ofen außen	Glas			Ablesungsubj.	Anzeigergerät	Schreibgerät (Punkt)	Schreibgerät (Linie)	Spezialgerät	
Gesamtstrahlung 0,4 bis ~12 auch bis 10	S u H Ardom.engwink.	X			800—1600 und mehr	20		X	X	X		2
	Pyrola Pyro		X		50— 500	40	X					1—2
	Pyrradio H u B	X			verschieden			X	X	X		
	Honeywell (RH)	X			500—1600	60 bzw. 20		X	X	X		2
	Ardonox S u H		X		—600	50		X		X		2—3
	Honeywell (RL-1)		X		—600	20		X	X	X		2
< 4 bis ~10	Oberfl. Pyr. Land		X		300— 900, 800—1200	Fläche ~ 5 cm²		X				~ 2
	Glas Land			X	100—1000			X		X		
Teilstahlung ~ 0,65	Glas S u H			X	—1500			X		X		
	Pyropto H u B	X		X	700—1500, 1200—2000	~ 10	X					} 5—10 je nach Übung
	Optix Pyro	X			750—1200, 1100—1800	~ 10	X					
	Fotoelem. HuB	X			1200—1600			X		X	X	< 1

Temperaturmessungen im Glasbad sind bekanntermaßen schwierig und kostspielig. Sie sollten deshalb nur in Sonderfällen vorgesehen werden. Bei unerprobten Schmelzwannenbauarten oder Sondergläsern in normalen Wannen sind solche Messungen jedoch häufig unerläßlich. Die Meßlöcher für Dauermessungen werden meist im Wannenboden angeordnet. Da die etwa 20 bis

Die Regelung der Temperaturen von Glasschmelzwannen ist nur in Ausnahmefällen befriedigend gelungen, und es erscheint fraglich, ob sie überhaupt in jedem Fall zweckmäßig und wünschenswert ist. Da diejenige Temperatur, die eigentlich konstant zu halten wäre, nämlich die Glastemperatur in der Oberflächenschicht des Bades, nicht direkt meßbar ist, muß man nach einer ande-

ren Meßgröße suchen, die der Glasbadtemperatur genügend genau folgt und in einer bestimmten bekannten Beziehung zum Glasdurchsatz steht. Die Boden- und Seitenwandglasstemperaturen scheiden für die Regelung aus, weil sie Änderungen in der Beheizung viel zu träge folgen. Die optisch gemessene Glasoberflächentemperatur ist ebenso wenig als Führungsgröße für einen Temperaturregler geeignet, da sie zu sehr von Ofenatmosphäre, Flammen und Gemengeschaum beeinflusst wird. Es bleibt demnach eigentlich nur die Gewölbetemperatur als eine der Regelung zugängliche Größe. Betriebsergebnisse mit praktisch ausgeführten Anlagen sind kaum veröffentlicht worden [8]. Enttäuschende Erfahrungen haben in USA jedenfalls dazu geführt, viele neuere Schmelzöfen nicht mehr mit Temperaturregelung auszustatten [5]. Die Schwierigkeiten sind weniger in der Regelstrecke mit ihrer großen Totzeit zu suchen, die von der gerätetechnischen Seite sicher zu meistern wären, als in den Besonderheiten des Glasschmelzvorganges und in der Betriebsweise des Regenerativofens. So würde beispielsweise eine unter den Bereich des Temperaturfühlers schwimmende Schaumschicht durch Verminderung des Wärmeüberganges zum Glasbad die Temperatur des Gewölbes steigern und somit den Regler zur Drosselung der Brennstoffzufuhr veranlassen, während in Wirklichkeit zum Zurückdrängen der Schaumgrenze eine Erhöhung der Temperatur erforderlich wäre. Beim Umsteuern lassen die Beheizungspausen dagegen die Gewölbetemperaturen um etwa 50°C abfallen, worauf ein Regler mit Erhöhung der Brennstoffzufuhr bis zu einer einstellbaren Höchstmenge reagierte. Kurz vor Erreichen des Temperatursollwertes würde die Beheizung dann vorübergehend unter das durchschnittlich erforderliche Maß sinken bis die Sollwerttemperatur einspielt. Diese Wärmeflusschwankungen können sich über Beeinflussung der Glasströmungen in der Wanne ungünstig auf die Glasgüte auswirken, so daß man heute dazu neigt, statt der Temperatur die Brennstoffzufuhr und die Verteilung auf die einzelnen Brenner für den jeweiligen Wannendurchsatz konstant zu halten. Kleine Temperaturabweichungen, besonders beim Umsteuern, nimmt man dabei in Kauf, um so eher, als Gewölbetemperaturen erfahrungsgemäß mehr äußeren Einflüssen unterliegen und infolgedessen stärker schwanken können als die Temperatur der Glasmasse selbst. Die ganze Problematik der Messung und Regelung von Glasschmelzwannen ist in [9] eingehend untersucht und dargelegt worden.

Will man eine Temperaturregelung dennoch vornehmen, so ist zur Beseitigung der Hauptstörrößen eine Brennstoff-Luftverhältnisregelung sowie eine Herdraumdruckregelung unerlässlich, und, falls die Brennstoffzufuhr Schwankungen unterliegt, auch eine Mengen- oder mindestens Druckregelung. Es ist weiterhin zweckmäßig den Temperaturregler nicht unmittelbar auf ein Stellorgan in der Brennstoffzufuhr, sondern auf einen Brennstoff- und Luftmengenregler über Verstellung ihrer Sollwerte wirken zu lassen. Damit werden gleichzeitig Störungen durch Druckschwankungen, wechselnde Leistungswiderstände und Verzögerungen in der Angleichung der Luftzufuhr ausgeschaltet [10].

### 1.2. Regeneratorkammern

Besonders bei hochbelasteten Wannen ist unbedingt auf möglichst gleichmäßigen Gang zu achten. Ungleich-

mäßig beheizte Regeneratorkammern können die Beheizung erheblich stören, da relativ kalte Kammern auf der einen Seite mäßige Luftvorwärmung, größeren Brennstoffbedarf, längere Flammen, größere Abgasmengen und damit heißere Kammern auf der anderen Seite zur Folge haben, die wiederum über geringeren Brennstoffverbrauch die kalte Seite noch kälter werden lassen. Ohne Eingreifen von Hand oder über selbsttätige Umsteuerung nach der Kammertemperatur wird also die Wanne immer einseitiger beheizt werden und erhebliche Schwierigkeiten in der Führung verursachen. Gleichmäßiger Wannengang ist deshalb einer der größten Vorteile, wenn nach der Kammertemperatur umgesteuert wird, sei es von Hand oder selbsttätig. In Regeneratorkammern ordnet man zur Überwachung der heißesten Stellen der Ausgitterung Thermoelemente über oder zuweilen in der Gitterpackung an. Falls man nicht in Abhängigkeit von diesen Temperaturen die Wannenumsteuerung vornimmt, erscheinen diese Meßstellen jedoch nicht

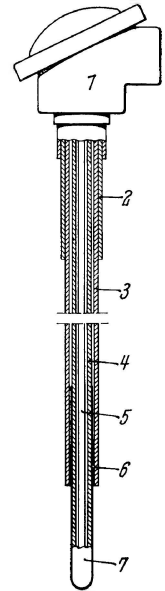


Bild 4a. Platinschutzrohre für Glasbadthermoelemente, Bauart Schott & Gen. 1. Thermoelement-Anschlußkopf, 2. Stahlhalterrohr, 3. Degussitrohr, 4. Degussitrohr, 5. Kapillare, 6. Verkittung, 7. Platinmantel.

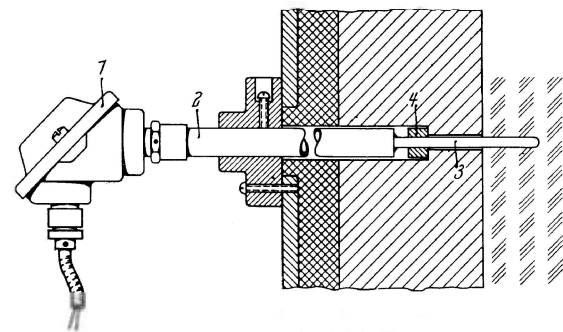


Bild 4b. Platinschutzrohre für Glasbadthermoelemente, Bauart nach [15]. 1. Anschlußkopf, 2. Schutzrohr wärmebeständiger Stahl, 3. Platinschutzrohr, 4. Sillimanitblock.

unbedingt erforderlich, da optische Kontrollmessungen genügen. Ebenso kann man auf Temperaturmessungen der einzelnen Kammerfüße verzichten, sollte aber Meßlöcher für Gelegenheitsmessungen vorsehen. Dagegen ist die Überwachung der Gesamtabgastemperatur jeder Seite vor den Umsteuerorganen von Bedeutung, um Kammerschäden und Falschlufteinbrüche rechtzeitig zu erkennen und die Wärmeausnutzung in dem Regenerator beurteilen zu können. Nach Angaben dieser Meßstellen wird ferner in der Regel der symmetrische Gang der Wanne durch entsprechendes Umsteuern von Hand nach einem Registriergerät, oder bei selbsttätigem Umsteuern nach Zeit, in Ausnahmefällen auch nach der Temperatur [11, 12, 13] überwacht.

### 1.3. Speiserrinnen

Speiserrinnen sollen grundsätzlich mit Glasbadthermoelementen (Bild 4) oder Pyrometern versehen sein, um das Tropfengewicht im Speiser konstant halten zu können. In den Vereinigten Staaten haben sich für diesen

Zweck besonders engwinklige Pyrometer eingeführt. Die Thermoelemente werden zur Verhütung übermäßigen Verschleißes häufig mit Platinschutzkappen versehen (Bild 4a und b). Sind sie, wie es bei der Bauart auf Bild 4b der Fall ist, mit einem von der Platinkappe bis zum Anschlußkopf elektrisch leitenden Schutzrohr versehen, so muß beachtet werden, daß das Glasbad ein gegen Erde verschiedenes elektrisches Gleichspotential besitzt, das einige Zehntel Volt betragen kann [14]. Bei Erdung der Schutzarmaturen werden daher Ströme in das Glasbad eingeleitet, die zur Blasenbildung führen können. Ganzmetallschutzarmaturen sind des-

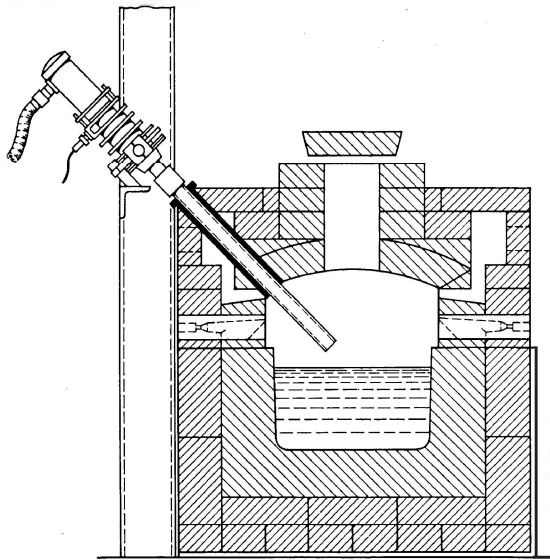


Bild 5. Einbau eines Strahlungs-pyrometers in eine Speiserinne [15].

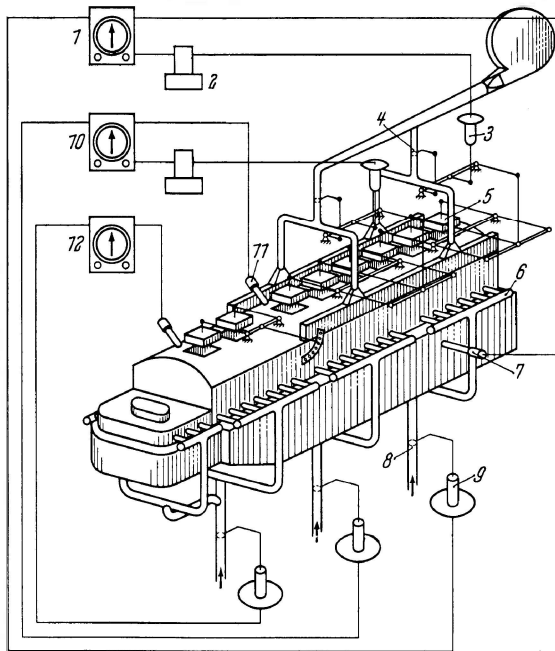


Bild 6. Regelkreise einer Speiserinne mit Luftkühlung (Honeywell-Brown).

1. Elektronikregler für Kühlzone 1, 2. Hilfsregler für Luftkühlung, 3. Stellmotor für Luftkühlung und Rinnendruck, 4. Stellglied für Kühlluft, 5. Stellglied für Rinnenabgasdruck, 6. Brennergruppe Zone 1, 7. Glasbadthermoelement Zone 1, 8. Stellglied Gas-Luftgemisch Zone 1, 9. Stellmotor für Gas-Luftgemisch Zone 1, 10. Elektronikregler Kühlzone 2, 11. Strahlungs-pyrometer Kühlzone 2, 12. Elektronikregler Ausgleichzone.

halb gut isoliert gegen Masse zu befestigen. Da die in Bild 4a gezeigten keramischen Armaturen den Anschlußkopf gegen das Glasbad isolieren, sind hier besondere Schutzmaßnahmen nicht erforderlich, es ist lediglich darauf zu achten, daß das Thermopaar keine Verbindung zur Erde besitzt. Die Anzahl der Meßstellen richtet sich nach der Länge der Rinne, im allgemeinen sind drei bis sieben Elemente erforderlich. Die Anordnung wird vorzugsweise seitlich etwa 3–5 cm unterhalb des Glasspiegels und in Bodenmitte getroffen, und zwar so, daß je ein Seiten- und Bodenelement in der gleichen Querschnittsebene stehen, um den Glasstrom auf gleichmäßige Temperatur bringen zu können. Werden sie als Fühler für die Temperaturregler benutzt, so sollen sie 600–750 mm vom Ende der Regelzone entfernt sein [15]. Häufig wird in Speiserrinnen auch mit Strahlungs-pyrometern unter einem Winkel von etwa 45° gemessen, um die Querschnittstemperatur des Stromes zu erfassen (Bild 5) [15]. Besonders in USA werden meist an zwei Strahlungs-pyrometern die Temperaturregler für die Kühl- und Ausgleichzone angeschlossen (Bild 6). Zweck der Kühlzone ist es, die Glasktemperatur sehr rasch herunterzudrücken. Dabei läßt man gleichzeitig mit der Kühlluft die Seiten-

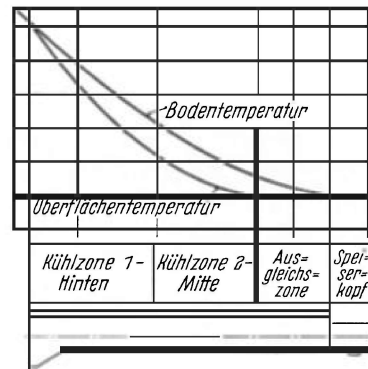


Bild 7. Temperaturverlauf der Glasoberfläche und des Glases am Rinnenboden entlang einer luftgekühlten Speiserinne.

brenner untergeringer Beheizung, um den Einfluß der zusätzlichen Wandkühlung auf die Seiten des Glasstromes zu vermindern. In der anschließenden Ausgleichzone wird nun die unter die Verarbeitungstemperatur gedrückte Glasoberfläche wieder auf die Glasbodentemperatur gebracht (Bild 7). Der Regler der Kühlzone beeinflusst die für den gewünschten

Temperatursollwert erforderliche Luftmenge und gleichzeitig die Stellung der Ofenraumdruck-Regelklappen, so daß Luftströmungen längs der Rinne durch Druckgefälle vermieden werden. Der Regler der Ausgleichzone sorgt durch Nachstellung der Beheizung in dieser Zone und im Speiserkopf für eine über den ganzen Glasquerschnitt gleiche Verarbeitungstemperatur. Als Vorteile der Pyrometer werden angegeben: Keine Störungen durch Bruch des Thermoelementes, schnellere Ansprechgeschwindigkeit als bei den von der Wand beeinflussten Thermoelementen, unverändert bleibende Anzeige bei praktisch unbegrenzter Lebensdauer. Werden die Speiserrinnen nur mit Gasbrennern beheizt, die weitgehend unterteilt entlang der ganzen Rinne angeordnet sind, so ist eine automatische Temperaturregelung nicht unbedingt erforderlich, insbesondere dann, wenn der Durchsatz selten geändert wird und gute Bedienungskräfte vorhanden sind [16]. Ihre Vorteile jedoch, wie selbsttätige Einhaltung der Temperatur, die die Bedienung für andere Aufgaben freimacht, weniger Brennstoffverbrauch, schnelles Einspielen neuer Temperaturen bei Artikelwechsel, damit bessere Glasgüte und Ausbeute, machen die Anschaffung einer Regelungseinrichtung bald bezahlt.

1.4. Unitmelter

Die Messung der Temperaturen in dem Schmelz- und Läuterteil erfolgt wie bei den üblichen Wannengebäuden mit Thermoelementen oder Pyrometern im Gewölbe. Häufig genügen dazu zwei Meßfühler [17, 18]. Da diese Wannen ohne oder mit geringer Luftvorwärmung arbeiten, keine Umsteuerung benötigen und überdies meist mit gleichbleibendem Durchsatz betrieben werden, ist eine Regelung der Temperatur verhältnismäßig einfach auszuführen, andererseits aber auch nicht unbedingt erforderlich, es sei denn, man will die Einheit mit ungeschulten Leuten betreiben. Auf jeden Fall empfiehlt es sich, sorgsam zu prüfen, ob nicht die Voraussetzungen zu einer konstanten, nur vom Durchsatz abhängigen Brennstoffzufuhr gegeben sind. Diese Betriebsweise wird fast immer dann vorteilhaft sein, wenn die Belastung der Wanne über längere Zeiträume gleichbleibt.

1.5. Hafen, Neben- und Bandkühlöfen

Hafenöfen, insbesondere Einhafenöfen besitzen meist nur eine Temperaturmeßstelle im Oberofen, die auch völlig ausreicht, wenn sie richtig angeordnet ist. Sehr günstig für eine einwandfreie Ofenführung wirkt sich die Registrierung oder zum mindesten Anzeige der Kammerabgastemperaturen aus, nach denen die Umsteuerzeiten im Sinne gleicher Temperaturen beider Seiten korrigiert werden können. Die Regelung der Ofenraumtemperatur ist infolge der verhältnismäßig geringen Totzeit der Regelstrecke nicht allzu schwierig [19].

Nebenöfen kommen in der Regel ebenfalls mit einer oder zwei Meßstellen aus, sofern es sich nicht um Temperöfen oder Kammerkühlöfen für hohe Ansprüche handelt. Elektrisch beheizte Öfen können leicht durch Ein-Aus- oder Stern-Dreieck-Schaltungen auf der gewünschten Temperatur gehalten werden. Häufig ist es dabei zweckmäßig, einzelne Beheizungsgruppen eines Ofens, z. B. oben, unten, Seiten, mit getrennten Reglern zu bedienen, um eine gleichmäßige Ofenraumtemperatur einstellen zu können (Bild 8). Eine Übertemperatursicherung ist bei Beheizung mit elektr. Strom sehr zu empfehlen, um bei Versagen eines Reglers Schäden am Kühlgut und Ofen zu vermeiden. Von einer Regelung zweitrangiger Nebenöfen kann in den meisten Fällen abgesehen werden, wenn Vorkehrungen getroffen sind, daß mögliche Störgrößen nicht allzusehr ins Gewicht fallen (z. B. Gasdruckschwankungen).

Bandkühlöfen sollten als Minimum bei geringen Anforderungen drei Meßstellen erhalten: im Gebiete der höchsten Temperatur, am Ende der beheizten Zone und in etwa gleichem Abstand im unbeheizten Teil, um eine bestimmte Kühlkurve wenigstens annähernd verwirklichen zu können (Bild 9). Bei Kühlbändern für empfindliche Erzeugnisse muß die Anzahl der Thermoelemente an Hand einer Kühlbandzeichnung, aus der die Anordnung der beheizten Zonen zu ersehen ist, und auf Grund der geforderten Temperaturzeitkurve [20, 21] so bestimmt werden, daß diese Kurve in jedem entscheidenden Abschnitt mit Hilfe der Brenner und Luftklappen eingestellt und überwacht werden kann. Bei breiten und hohen Kühlbändern sind eine genügende Anzahl Kontrollstellen auf der Gegenseite und im oberen Teil der Kühlbahn vorzusehen, um die Gleichmäßigkeit der Temperaturverhältnisse prüfen zu können [1].

Zur Regelung solcher Öfen genügt im allgemeinen ein Meßfühler an der Stelle höchster Temperatur, der die Gesamtbrennstoffzufuhr der Heizzonen beeinflusst. Das Thermoelement muß dabei so im Heizmedium liegen, daß es Änderungen seiner Temperatur mit möglichst geringer Verzögerung folgt, also an Stellen hoher Gasgeschwindigkeit in Nähe der Heizquellen, wobei es vor verfälschenden Strahlungseinflüssen zu schützen ist. Weitere beachtenswerte

Gesichtspunkte zur Temperaturregelung von Industrieöfen sind in [22] angegeben worden.

Einen Sonderfall stellen elektrisch beheizte Bandkühlöfen dar. Sie sind in eine Anzahl von

Kühlzonen eingeteilt, die jeweils einen Luftumwälzventilator besitzen. Diese Öfen benötigen für jede solche Zone einen Regelkreis einen Regelkreis zur Registrierung und Regelung. Die Anordnung ist meist vom Hersteller vorgeschrieben. Es muß darauf geachtet werden, daß die Meßfühler für die Regler so im Luftstrom liegen, daß sie, nicht zu sehr von Strahlung beeinflusst, die Temperatur der umgewälzten Luft erfassen, bevor sie das Kühlgut berührt.

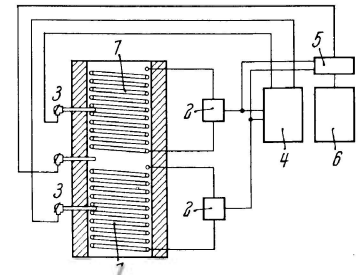


Bild 8. Elektrisch beheizter Temperöfen mit Zweizonenregelung. 1. Heizelemente, 2. Schaltschütze, 3. Thermoelemente, 4. Zeitplanregler für 2 Regelkreise (Joens), 5. Maximumwächter (Kleinregler), 6. Registriergerät (für mehrere Öfen).

2. Verbrennungsablauf

2.1. Schmelzwannen

Die Herstellung brauchbaren Glases hängt von einem geeigneten Zeittemperaturverlauf ab, dem die einzelnen Gemengeteilchen unterworfen werden. Daraus ergibt sich für jede Schmelzwanne und für jeden Durchsatz eine ganz bestimmte, optimale Temperaturverteilung in der Längsachse. Das Temperaturbild seinerseits hängt im wesentlichen von der Brenneranordnung, der Brennstoffmenge jeder Flamme und dem Verbrennungsablauf in den Flammen ab. Brennstoff- und Verbrennungsluftmenge jedes Brenners und bei Ölfuerungen die zugehörigen Zerstäubungsluftmengen sind also bei einer gegebenen Wanne die Haupteinflußgrößen auf den Ablauf der Schmelze von der Wärmeseite her. Da sie außerdem verhältnismäßig leicht meß- und regelbar sind, können diese Meßgrößen weitgehend zur Führung der Schmelzwanne eingesetzt werden [9].

Fordert man einen optimalen Ablauf der Verbrennung, so muß der Brennstoff im Feuerraum der Wanne mit einem ganz geringen Luftüberschuß vollständig verbrennen. Das bedeutet gleichbleibende Einhaltung des Heizwertes und der Zusammensetzung des Brennstoffes, der fühlbaren Wärmen und den Zufuhrmengen

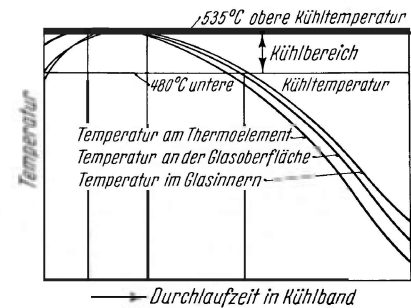


Bild 9. Kühlkurve längs eines Bandkühlofens [20].

von Brennstoff und Luft sowie deren Mischungsbedingungen [9].

Generatorgase gleichbleibender Zusammensetzung und Qualität zu bereiten, ist bekanntlich besonders schwierig. Voraussetzungen hierzu sind Messung der Kohlen-, Luft- und Dampfzufuhren. Einzelheiten über die hierzu notwendige Meßgeräteausstattung finden sich in [23] und [24]. Sofern nicht Ferngas oder Öl, sondern Generatorgas oder gar Mischgas benutzt wird, ist die Regelung oder zum mindesten die Überwachung des Heizwertes des Brenngases empfehlenswert und bei Einsatz einer Brennstoff-Luft-Verhältnisregelung sogar unerlässlich, soll diese sinnvoll sein. Bei gleichzeitiger Verwendung verschiedener Brennstoffe, wie z. B. Gas und

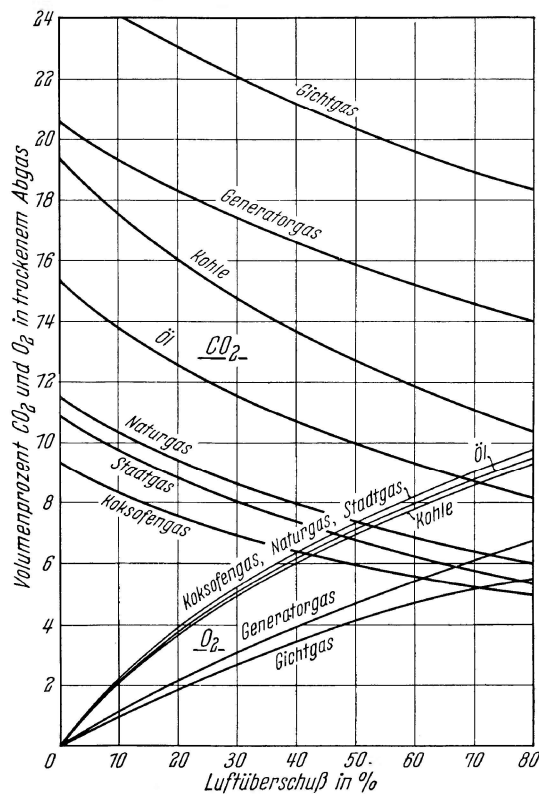


Bild 10. CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>-Gehalt verschiedener Brennstoffe in Abhängigkeit vom Luftüberschuß [26].

Öl, kann der jeweilige Heizwert des Gemisches als Führungsgröße zur Verhältnisregelung herangezogen werden [24, 25]. Die Konstanz der fühlbaren Wärmen muß sich im allgemeinen auf Gleichhaltung der Vorwärmertemperaturen von Gas und Luft, also auf gleiche Kammertemperaturen beider Wannenseiten beschränken, da ihre absoluten Größen bei gegebenen Betriebsverhältnissen kaum zu beeinflussen sind. Die Zufuhrmengen von Brennstoffen sind mit Ausnahme von ungereinigtem Generatorgas verhältnismäßig leicht zu messen. Neben der Messung der Gesamtbrennstoffzufuhr ist die Messung der Teilmengen zu den einzelnen Brennern zur Einstellung reproduzierbarer Temperaturverhältnisse unerlässlich. Das gleiche gilt für die Luftmengen, was die Anordnung getrennter Luftschieber und Regeneratorkammern für jeden Brenner erfordert, wenn man sich nicht mit der einfachen, aber meist unzureichenden Art der Luftzuteilung begnügen will, Steinplatten in die Brennerschächte einzuschieben.

Zur Einhaltung gleichbleibender Mischungsbedingungen müssen die Brennerschächte und Brenner-

mäuler laufend überwacht werden, da diese infolge der hohen Temperaturbeanspruchung und durch Einwirkung der Gemegedämpfe Formveränderungen und Zerklüftungen unterliegen, die den Mischvorgang und damit die Ausbildung der Flammen verändern. Verwendet man Heizöl, spielt dieser Einfluß eine geringe Rolle, da die große kinetische Energie des Öl-Preßluftstrahles die Verbrennungsluft gleichsam mitreißt. Die Mischbedingungen werden dagegen in diesem Fall weitgehend durch Zerstäubung und Viskosität des Öles sowie von der Richtung des Ölstrahles in der Wanne beeinflusst. Es muß also dafür gesorgt werden, daß bei gleichbleibendem Öl die Vorwärmtemperatur in engen Grenzen, etwa  $\pm 5^\circ\text{C}$ , konstant gehalten wird, ferner, daß die Menge der Zerstäubungsluft im richtigen Verhältnis zur Ölmenge bleibt. Damit wird neben der Teilmengenmessung des Öles auch die der Preßluft erforderlich, um gleichbleibende Flammenausbildung zu erreichen. Für die Richtung des Ölstrahles in der Wanne empfiehlt es sich, auf den Haltegestellen Einstellskalen für die Brennerdüsenbefestigung anzuordnen, damit eine durch Versuche als günstig ermittelte Einstellung überwacht und wiederhergestellt werden kann.

Nach dem Vorhergehenden erscheint die Einhaltung eines konstanten Luftverhältnisses durch Zuteilung der jeweils erforderlichen Verbrennungsluftmenge recht einfach. In Wirklichkeit besteht jedoch oft ein beträchtlicher Unterschied zwischen zugemessener und wirklich in den Verbrennungsraum gelangender Luft.

Undichte Regeneratorkammerwände und Wechsellinrichtungen verursachen Falschlufzutritt oder Luftverlust je nach Unter- und Überdruck. Ernster zu nehmen ist der Falschlufzutritt durch Undichtigkeiten in dem Verbrennungsraum der Wanne, da in diesem Fall zur Erniedrigung der Flammentemperatur eine örtliche Abkühlung kommt. Die Einhaltung eines bestimmten, jedoch nicht zu großen Herdraumdruckes, also eine Druckregelung, ist demnach auch im Hinblick auf die Glasgüte erforderlich. Welchen Einfluß schon ein Luftüberschuß von 15% auf den Verbrennungsablauf hat, geht daraus hervor, daß die theoretische Flammentemperatur dadurch um 150–200°C herabgesetzt wird, womit eine beträchtliche Verminderung des Wärmeübergangs verbunden ist.

Da unnötiger Luftballast in jedem Fall Mehrkosten an Brennstoff verursacht, ist es hauptsächlich eine wirtschaftliche Forderung, sich nicht mit Mengenmessungen zu begnügen, sondern durch regelmäßige Abgasanalysen, möglichst jeden Brenners, den tatsächlichen Verbrennungsablauf zu überwachen. Dazu ist allerdings eine gründliche Kenntnis der Verbrennungsvorgänge und der Abhängigkeit des jeweiligen CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Gehaltes vom Luftüberschuß bei verschiedenen Brennstoffen erforderlich. Eine gute Übersicht über die wesentlichen Zusammenhänge gibt [26], woraus auch Bild 10 entnommen ist. Als man erkannt hatte, wie wichtig es ist, den Luftüberschuß zu überwachen, hat man vielfach versucht, das Brennstoff-Luftverhältnis in Abhängigkeit vom Restsauerstoffgehalt der Abgase zu regeln. Aus verschiedenen Gründen ist eine solche Regelung nicht gerade einfach. Die Hauptbedenken sind in [26] aufgeführt und kritisch betrachtet. Sie seien nachfolgend kurz herausgestellt:

1. Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit der Abgasanalysergeräte.

Sie sind seit der Entwicklung der magnetischen Sauerstoffmesser bei guter Wartung zufriedenstellend.

2. Undichtigkeiten und Verstopfungen in der Entnahmeevorrichtung.

Sie bereiten besonders bei staubhaltigen und kondensatabscheidenden Abgasen immer noch erhebliche Schwierigkeiten.

3. Die Anzeigeverzögerung.

Sie beträgt auch bei bester Auslegung der Leitungen und Armaturen meist mehr als 30 Sekunden. Bei größeren und raschen Brennstoffmengenschwankungen ergibt sich daraus eine unzureichende Nachregelung des Brennstoff-Luftverhältnisses.

4. Falschlufztutritt in Schmelzwanne und Abgaszügen.

Dieser stört bei Messung des Sauerstoffgehaltes erheblich mehr als bei der  $\text{CO}_2$ -Analyse. So verursachen 5% Luftzutritt 50% Fehlanzeige bei 2%  $\text{O}_2$  im Abgas, dagegen nur 0,5% bei einem Gehalt von 10%  $\text{CO}_2$ ! Daran scheitern Versuche einer Regelung nach dem  $\text{O}_2$ -Gehalt in allen Fällen, in denen mit größerem oder gar wechselndem Falschlufztutritt gerechnet werden muß. Das trifft für normale Glasschmelzwanne auch bei guter Herdraumdruckregelung zu, sofern sie nicht mit Überdruck an allen Leckstellen betrieben werden.

Die Frage, ob man einen an das Analysengerät angeschlossenen Regler direkt auf die Nachregelung der Verbrennungsluft wirken lassen oder diesen Regler nur zur Nachstellung des Mischungsverhältnisses an einem Gemischregler benutzen soll, kann nicht generell entschieden werden, im allgemeinen ist aber letztere Lösung die sicherere.

In Anbetracht der Schwierigkeiten und des Aufwandes an Wartungsdienst und Anschaffungskosten begnügt man sich in der Regel mit einer Brennstoff-Luftverhältnisregelung. Sie ist mit Hilfe von Meßblenden und Stellgliedern in der Luftzufuhr verhältnismäßig einfach und zuverlässig ausführbar. Periodische oder dauernde Überwachung der Abgase ist wegen der Rückwirkung des Luftüberschusses auf die Wärmeübertragung der Flamme und aus wirtschaftlichen Gründen unerlässlich.

Schmelzwanne mit gleichbleibendem Durchsatz, besonders wenn sie nach konstanten Brennstoffmengen und nicht nach Temperatur geführt werden, kommen in vielen Fällen ohne selbsttätige Regelung der Luft aus, da der Schmelzer bei den ohnedies seltenen Brennstoffmengenänderungen auch die Luft nach einer Tabelle oder dergleichen von Hand nachstellen kann [27]. Periodische Analysen sind jedoch auch hier unbedingt erforderlich.

Als Entnahmestellen werden bei Schmelzwanne zweckmäßigerweise Löcher in den Rückwänden der einzelnen Brennerschächte gewählt, und zwar etwa in Höhe der Rauchgasumlenkung aus dem Brennermund. Es ist dies eine Stelle, an der die Abgase verschiedener Schichten auftreten und durchmischt werden, so daß man eine relativ gute Durchschnittsprobe erhält. Da sie unmittelbar im Gasstrom liegt, machen sich Änderungen der Atmosphäre schnell bemerkbar. Durch ihre Höhe ist gewährleistet, daß an der Entnahmestelle stets Überdruck herrscht — eine Vorbedingung für eine unverfälschte Gasprobe.

Es sind verschiedene Gasentnahmeevorrichtungen bekannt geworden. Man benutzt beispielsweise wassergekühlte Sonden nach Bild 11 [28], durch die das Gas mit einer Dampfstrahlpumpe über Staub- und Wasserabscheider dem  $\text{O}_2$ -Prüfer zugeführt wird. Als Rohr findet Kupferrohr von 6 mm  $\varnothing$  Verwendung in Längen bis zu 70 m. Die jeweils abziehende Seite wird über ein Umschaltventil mit dem Meßgerät verbunden, während die andere zur Verhütung von Kondensatablagerungen ins Freie abbläst. Als Anzeigeverzögerung ergaben sich 35 s. Durch eine ähnliche Bauart, jedoch mit trockener Pumpe und Filterung, gelang es, die Totzeit auf 15 s zu vermindern [29]. Weitere Bauarten sind in [30] beschrieben worden. Keramische Sonden werden vorteilhaft nur

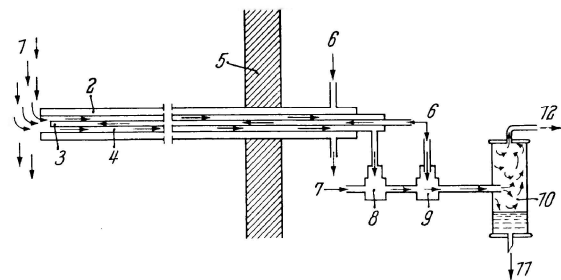


Bild 11. Wassergekühlte Gasentnahmeevorrichtung [28].  
1. Abgas, 2. Entnahmerohr, 3. Düsen, 4. Abgas und Wasser, 5. Ofenwand, 6. Wassereintritte, 7. Dampf eintritt, 8. Dampfstrahlpumpe, 9. Einspritzkondensator, 10. Abscheider, 11. Verunreinigungen, 12. Reingas zum Gasprüfer.

für vorübergehende Messungen verwendet, da sie leicht brechen und Nachverbrennungen im heißen Bereich möglich sind. Auf die Verbindung zu dem Metallrohr, die leicht undicht wird, muß besonders geachtet werden. Der Einbau kann nach oben oder nach unten geneigt erfolgen (Bild 12a und b), nach unten vorzugsweise bei staubhaltigem Abgas. Bei nach oben geneigten Entnahmesonden fließt anfallendes Kondenswasser in Richtung des Gasstromes in kältere Bereiche. Dies ist von Vorteil gegenüber abwärts geneigten Rohren, in denen das Wasser zum heißen Teil abfließt und gelöste Verunreinigungen durch Verdampfen des Wassers Verkrostungen bilden. Eine besondere Entnahmeevorrichtung für Generatorgas wurde in [31] angegeben. Sie besteht aus einem keramischen Entnahmerohr. Ein Doppelfilter ist in einem Isolierkasten direkt am Leitungsrohr befestigt. Als Leitungsrohre haben sich neuerdings Kunststoffschläuche von 4 bis 6 mm lichter Weite eingeführt. Als Pumpen findet man Wasserstrahlpumpen, Membranpumpen oder Fallrohrpumpen [32]. Allgemein wurde über Meß- und Regelfragen in [33] berichtet.

Abschließend sei noch erwähnt, daß die Überwachung der Rauchgaszusammensetzung bei rohgasbeheizten Wannen oft die einzige Möglichkeit bietet, zu einer Regelung der Verbrennungsverhältnisse zu kommen, da eine Mengemessung des Gases nur sehr schwer durchführbar ist.

## 2.2. Speiserrinnen

Speiserrinnen werden in der Regel mit Stadtgas, Naturgas oder Propan beheizt. Sie stellen an die Temperaturverteilung und -regelung hohe Anforderungen, die nur mit einer großen Anzahl sehr kleiner Brenner zu erfüllen sind. Dem Verfasser ist nur eine Speiserrinne bekannt, die mit Schweröl beheizt wird. Diese Speiser-

rinne ist durch einen Schieber im Verbrennungsraum in zwei Feuerungszonen geteilt, die mit Ölbrennern ausgerüstet sind, denen das Öl aus 3 m Höhe frei zufließt. Der Verbrennungsluftdruck beträgt 1300 mm WS. Die Ölmengen jeder Zone werden von Temperaturreglern in verhältnismäßig engen Grenzen geregelt, während die Luftmengen konstant bleiben.

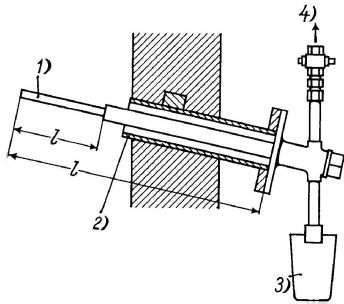


Bild 12a. Einbau von Gasentnahmesonden [30]. 1. Keramisches Rohr, 2. Durchführung, 3. Wasserabschluß, 4. Zum Analysengeber ( $R = 1/2''$ ).

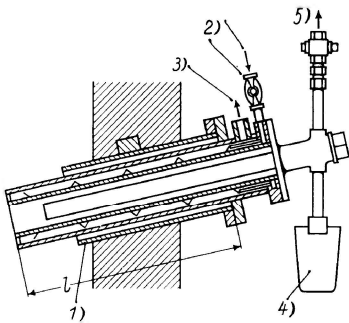


Bild 12b. Einbau von Gasentnahmesonden [30]. 1. Durchführungsrohr, 2.  $1/2''$ -Kühlwassereintritt Ventil um  $90^\circ$  versetzt gezeichnet, 3.  $3/4''$ -Kühlwasseraustritt, 4. Wasserabschluß, 5. Zum Analysengeber,  $1/2''$ -Absperrrhahn.

gemisch die Menge der zugemischten Luft berechnen, sofern der meist vernachlässigbar geringe  $O_2$ -Gehalt im Gas bekannt ist. Für sauerstofffreies Gas gilt die Beziehung:

$$L/G = \frac{O_2}{20,8 - O_2},$$

wobei  $L = Nm^3$  Luft,  $G = Nm^3$  Gas,  $O_2 =$  gemessener Sauerstoffgehalt in % bedeuten.

### 2.3. Unitmelter

Im Gegensatz zu Speiserrinnen werden Unitmelter häufig mit Heizöl betrieben. Auch hier ist die Beheizung auf eine größere Anzahl von Ölbrennern auf beiden Seiten der Wanne verteilt. Da diese Schmelzeinheiten ohne vorgewärmte Verbrennungsluft arbeiten, setzt man vorteilhaft Ölbrenner mit Gebläseluft als Zerstäubungshilfsmittel und zugleich Verbrennungsluft ein. Die meist vorgesehene Temperaturregelung verlangt die Ausschaltung aller Störgrößen durch Verbrennungsablauf und Herdraumdruck. Die Brenner sind so zu wählen, daß sie ein bestimmtes, einstellbares Öl-Luftverhältnis auch bei Verstellung der Ölmenge selbsttätig einhalten. Die Überwachung des Mischverhältnisses erfolgt im

allgemeinen durch Gasanalysen, es ist jedoch ratsam, wenigstens die Gesamtöl- und Luftmengen zu messen, um Verstopfungen und Koksansätze an den Brennern durch Mengenänderungen von Öl und Luft bemerkbar zu machen.

### 2.4. Hafen-, Neben- und Bandkühlöfen

Bekanntlich haben Schwankungen der Ofenatmosphäre, also der Abgaszusammensetzung, besonders bei optischen Spezialgläsern einen erheblichen Einfluß auf die Glasgüte. Hafenöfen für die Herstellung solcher Gläser müssen deshalb mit einer zuverlässigen Gemischregelung und Überwachung der Abgase ausgerüstet sein. Die bei großen Schmelzwannen auftretenden Abweichungen vom Ergebnis der Messung der Verbrennungsluftmenge infolge von Mauerwerksundichtigkeiten und Leckstellen im Oberofen sind bei Einhafenöfen weit geringer, vorausgesetzt, daß sie gut instand gehalten und mit Überdruck betrieben werden. Bei Verwendung von Fergas ist deshalb die Verhältnisregelung von Gas- und Luftmengen meist zufriedenstellend, falls von Zeit zu Zeit Abgaskontrollen gemacht werden. Generatorgas-beheizte Öfen lassen sich dagegen nur mit Abgasregistriergeräten im Verbrennungsablauf überwachen. Eine selbsttätige Korrektur des Reglersollwertes durch ein Sauerstoffmeß- und Regelgerät wurde an einem Ofen für hochwertige Spezialgläser erfolgreich durchgeführt [29]. Aus zwei umschaltbaren Entnahmesonden wird das Abgas mit einer Membranpumpe am jeweils abziehenden Brenner abgesaugt und durch die Meßkammer eines  $O_2$ -Messers gedrückt, der den Gemischregler nachstellt.

Nebenöfen besitzen meist keine Einrichtungen zur Einhaltung eines bestimmten Gas-Luftverhältnisses, obwohl auch hier Brennstoffeinsparungen durch einfache Regler möglich wären, da erfahrungsgemäß gerade bei diesen Öfen auf eine sorgfältige Überwachung wenig Wert gelegt wird.

Bei Bandkühlöfen mit ihrem höheren Wärmeverbrauch versucht man vielfach von vornherein durch entsprechende Konstruktion des Brennerzuleitungssystems oder durch Gemischregler den Verbrennungsablauf so günstig wie möglich zu gestalten. Im einfachsten Falle sieht man in den Gas- und Luftleitungen, die entweder alle Brenner des Ofens oder wenige Gruppen von Brennern speisen, Regulierorgane vor, die so miteinander gekoppelt sind, daß sie bei Verstellung ihr Öffnungsquerschnittsverhältnis beibehalten [35] (Bild 13a). Mit diesem Verfahren läßt sich jedoch keine Konstanz des Mischungsverhältnisses über einen größeren Regelbereich und für jeden einzelnen Brenner einhalten, wenn das System nicht sorgsam bemessen wird und die Vordrücke für Gas und Luft nicht konstant sind. Die zu beachtenden konstruktiven Gesichtspunkte sind in [36] eingehend behandelt worden. Eine bessere Regelung erzielt man mit Hilfe eines Druckreglers in der Gasleitung, der das Druckverhältnis in den Verteilerleitungen von Gas und Luft konstant hält (Bild 13b). Die sichere Einhaltung eines bestimmten Mischungsverhältnisses gewährleistet jedoch nur ein Gemischregler, der allerdings schon einen größeren Aufwand an Geräten erfordert (Bild 13c). Gleichgültig zu welcher Lösung man sich entschließt, immer sollte zumindest ein Gasmenge- und, wenn irgend möglich, auch ein Luftmenge-messer vorgesehen werden. Häufig werden Bandkühlöfen mit größerem Luftüberschuß betrieben, um

1. die Verbrennungsgastemperatur zu senken, 2. durch die größere Abgasmenge eine bessere Wärmeverteilung und 3. einen größeren Überdruck im Verbrennungsraum zu erhalten. Bild 14 zeigt den erforderlichen Luftüberschuß zur Senkung der Abgastemperatur und den dazugehörigen feuerungstechnischen Wirkungsgrad [37].

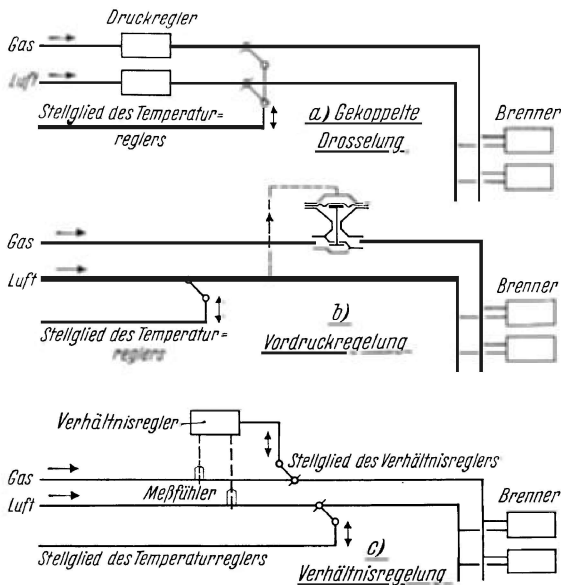


Bild 13. Möglichkeiten ein bestimmtes Gas-Luftgemisch konstant zu halten. a) Gekoppelte Drosselklappen, b) Vordruckregelung Gas-Luft, c) Verhältnisregelung.

Allgemein muß darauf hingewiesen werden, daß auch ein Gemischregler keine Gewähr für das richtige Luftverhältnis an jedem einzelnen Brenner gibt, wenn nicht das gesamte Leitungssystem richtig ausgelegt ist [35].

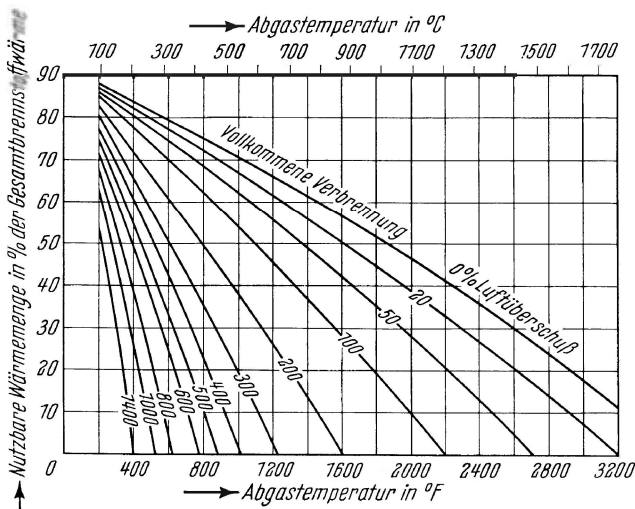


Bild 14. Abgastemperatur in Abhängigkeit vom Luftüberschuß [37].

In [35] wird außerdem gezeigt, welche Gesichtspunkte im Hinblick auf den verlangten Regelbereich und den Ablauf des Verbrennungsvorganges bei der Auslegung der Regelstrecke zu beachten sind, besonders wenn sie mit einer Temperaturregelung gekoppelt ist.

### 3. Herdraumdruck

#### 3.1. Schmelzwannen

Vor einigen Jahren war die Regelung des Herdraumdruckes noch ungebrauchlich, teils weil geeignete Geräte

zur Messung und Regelung fehlten, teils weil ihr Wert noch nicht erkannt worden war. Heute ist sie eines der wichtigsten Hilfsmittel zur Führung von Schmelzöfen und zur Ersparnis von Brennstoff sowie Voraussetzung zum Gelingen einer wirksamen Temperatur- und Gemischverhältnisregelung. Bekanntlich ändert sich ohne Regelung der Druck im Herdraum in Abhängigkeit vom Abgasvolumen (abhängig seinerseits u. a. von Brennstoff- und Luftmengen, Kammertemperatur, Falschluff), vom Auftrieb in den Kammern, vom Strömungswiderstand im gesamten Ofen und vom Kaminzug.

Da ein Glasschmelzofen-Herdraum nie luftdicht gegen die Umgebung abgeschlossen werden kann, findet bei Überdruck eine Abgasströmung in Richtung zu den Undichtigkeiten im Mauerwerk und Ausflammen an den größeren Öffnungen statt, während bei Unterdruck durch diese Leckstellen Falschluff angesaugt wird. Da weiterhin dieser Gastransport mit einem Wärmetransport verbunden ist, wird die Temperaturverteilung im Herdraum von diesen Vorgängen so stark abhängig, daß man durch Beeinflussung dieses Druckes in bestimmten Teilen der Wanne, etwa der Arbeitswanne, die Temperatur verändern kann. Besonders Schmelzöfen mit Handverarbeitung des Glases, die große Arbeitsöffnungen besitzen, sind aus diesem Grunde sehr herdraumdruckempfindlich, zumal auch die Glasmacher durch Ausflammen stark in ihrer Arbeit behindert werden. Ausflammen bedeutet weiterhin einen Wärmeverlust, der die Kammertemperaturen herabsetzt, während Einziehen die Flammentemperatur durch allzugroßen Luftüberschuß vermindert und nachteilige örtliche Abkühlungen in der Schmelzwanne im Gefolge hat. Ungeregelter Herdraumdruck bedeutet daher eine erhebliche Störgröße für eine wirksame Temperatur- und Gemischregelung. Nach JEBSEN-MARWEDEL lassen sich die Vorteile der Ofenraumdruckregelung folgendermaßen zusammenfassen:

1. Bessere Konstanz von Temperatur und Ofenatmosphäre,
2. Geringerer Staubtransport von Gemenge im Ofen,
3. Bessere Vorbedingungen für Maschinenfertigung,
4. Kein Einziehen während und nach dem Wechseln,
5. Weniger Gallebildung durch Soda oder Sulfatstaub,
6. Geringerer Ofenverschleiß,
7. Geringe Wartung der Geräte.

Bild 15 zeigt typisch das Verhalten eines unregulierten Druckes im Vergleich zu einem regulierten.

Infolge des Auftriebes der heißen Ofengase und des Druckgefälles innerhalb des Ofenraumes, ist der Ofendruck je nach der Meßstelle verschieden groß. Es stellt sich deshalb die Frage, an welcher Stelle des Ofens der Impuls zur Regelung entnommen werden soll. Verständlicherweise scheiden alle Punkte aus, an denen eine dynamische Druckkomponente vorherrscht, also z. B. die Seitenwände bei Querbrennerwannen. Dagegen spielt die Größe des Auftriebes kaum eine Rolle, da er bei konstanter Feuerraumtemperatur ebenfalls konstant bleibt und deshalb durch Nullpunktverschiebung am Gerät ausgeglichen werden kann. Man wird also eine gut zugängliche, leicht überwachbare Stelle in der Mittel-

achse des Ofens im Gewölbe oder vorzugsweise den Stirnwänden so wählen, daß keine Flammeneinwirkung oder starke Verstaubung durch Gemenge zu befürchten ist. Entgegen anfänglichen Bedenken hat sich gezeigt, daß die einlegeseitige Stirnwand in einigem Abstand unter dem Gewölbeanschluß gut zur Druckentnahme geeignet ist. Die Öffnung wird hier kaum verlegt. Trotzdem sind Reinigungsstopfen in jeder Rohrrichtung vorzusehen. Ist man gezwungen, an die Seitenwände zu gehen, so werden zweckmäßigerweise die Öffnungen zweier gegenüberliegenden Seitenwände mit einer Rohrleitung verbunden, um den Druck symmetrisch aus der Mitte entnehmen zu können. Es besteht dabei allerdings

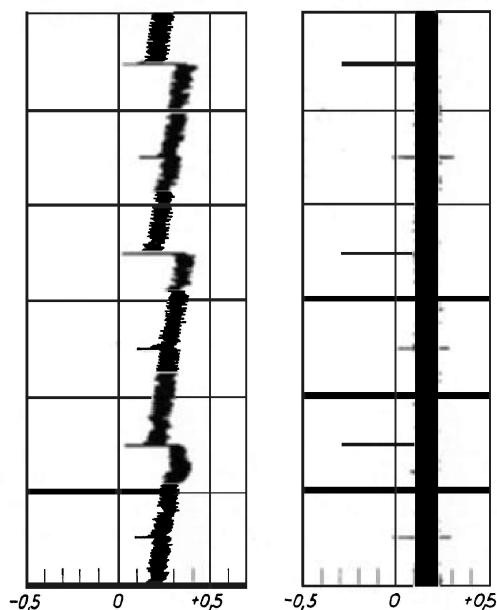


Bild 15. Registrierstreifen eines unregulierten Herdraumdrucks (links) im Vergleich zum regulierten (rechts).

die Gefahr, daß durch den Druckunterschied an beiden Stellen eine Strömung entsteht, die Kondensatablagerung im Rohr verursacht. Weniger geeignet ist die Stirnwand der Arbeitswanne, falls sie durch größere Entnahmelöcher unterbrochen wird oder wenn die Arbeitswanne durch eine mehr oder weniger dichte Schattenwand von der Schmelzwanne getrennt ist. Bei U-Flammenbeheizung wählt man vorteilhaft eine Stelle im Gewölbe, die symmetrisch innerhalb des „U“ liegt.

Da die Herdraumdruckregelung unabhängig von anderen Regelkreisen arbeitet und in verhältnismäßig einfacher Weise als technisch gelöst betrachtet werden kann, hat sie sich weitgehend eingeführt und gut bewährt.

### 3.2. Speiserrinnen

Speiserrinnen, die mit Kühlluft zur Herabsetzung der Glastemperatur arbeiten, müssen mit verstellbaren Abdecksteinen versehen sein. Sie gestatten, die erhitzte Luft zusammen mit den Abgasen der mit geringer Beaufschlagung weiterheizenden Brenner abzuführen. Um örtliche Wärmestauungen oder Abkühlungen zu vermeiden, ordnet man die Luft-Abgasöffnungen gleichmäßig verteilt entlang der zugehörigen Kühlzone der Speiserrinne an und verstellt zur Regelung des Ofenraumdrucks alle Abdecksteine einer Gruppe gleichzeitig um den gleichen Betrag, um keine Druckunterschiede entlang der Rinne zu verursachen. Ein leichter Überdruck von etwa 0,2 mm WS hat sich als zweckmäßig erwiesen.

Ein konstanter Ofendruck über den gesamten Regelbereich der Kühlluft ist wichtig, weil Druckunterschiede gegenüber benachbarten Zonen Verschiebungen des Kühlschwerpunktes herbeiführen können, die eine exakte Temperaturregelung erschweren. Zur Druckentnahme wählt man möglichst die Mitte der zugehörigen Zone und bringt die Bohrung seitlich über den Brennersteinen an, so daß Kondensprodukte nicht in das Glas gelangen können. Aus diesem Grunde ordnet man auch die Entnahme nicht mitten über dem Glasstrom an, obwohl sie meßtechnisch günstiger wäre.

### 3.3. Unitmelter

Bei der Herdraumdruckregelung von Unitmeltern gelten ähnliche Gesichtspunkte wie bei Schmelzwannen. Das Stellglied ist auch in diesem Falle eine Drosselklappe im Abgasstrom, die je nach baulichen Gegebenheiten vorzusehen ist. Die Druckentnahme erfolgt aus dem Gewölbe vorzugsweise in Nähe der Läuterzone [18].

### 3.4. Hafen-, Neben- und Bandkühlöfen

Wie bei der Gemischregelung an Hafenöfen bereits dargelegt, stellt die Konstanz des Herdraumdrucks eine der Grundlagen zur Regelung dieser Größe dar. Weiter darf Falschlucht nicht entlang der unteren Vorsetzerkante einströmen, wenn der Boden des Hafens gleichmäßig mit erwärmt werden soll. Da diese Vorsetzer niemals dicht schließen, muß dafür gesorgt werden, daß der Ofendruck nicht auf einen Wert absinkt, der an dieser gefährdeten Stelle Unterdruck zur Folge hat. Bei dem wechselnden Betriebszustand dieser Öfen kann diese Aufgabe jedoch nur von einem selbsttätigen Regler gelöst werden.

Als Druckentnahmestelle hat sich bei Einhafenöfen wohl allgemein die gut zugängliche Ofenrückwand eingebürgert. Die Höhe ist an sich nicht von besonderer Bedeutung, da die geregelte Druckhöhe entsprechend eingestellt werden kann. Meist wählt man die Ebene des oberen Hafenrandes, die vor Verstaubung hinreichend gesichert ist. Hier wird auch meist der Temperaturfühler vorgesehen [19].

Bei Nebenöfen begnügt man sich meist mit der Messung des Zuges an einer passenden Stelle. Aus dem Zug schließt man dann auf den Ofenraumdruck. Doch sollten auch hier einfache Feinstdruckanzeiger vorgesehen werden, da durch die leichtere Überwachung erheblich an Brennstoff gespart werden kann.

Bei Bandkühlöfen ist die Messung des Ofendruckes schwer durchführbar, sie werden meist durch Vorhalten der Hand auf Überdruck geprüft. Verbindet man damit die Anzeige eines Zugmessers, so hat man auch hier ein Mittel zur Hand, die Einstellung der richtigen Druckverhältnisse abzuschätzen.

## 4. Glasstandsmessung

### 4.1. Schmelzwannen und Unitmelter

Vor noch nicht allzulanger Zeit legte man den Veränderungen im Glasstand einer Schmelzwanne noch keine allzugroße Bedeutung bei. Zudem fehlte es an technischen Hilfsmitteln, die Glasspiegelhöhe genauer zu messen. Erst die zunehmende Maschinenfertigung und die höheren Anforderungen an die Ausbeute zwangen zu immer engeren Toleranzen in der Einhaltung des Glasstands. Man lernte aus Erfahrungen, daß 1% Schwankung in der Spiegelhöhe Gewichtsänderung des Glaspfens von ebenfalls etwa 1% verursachten [38].

Wandstärken und damit Inhalt von Hohlglaskörpern unterliegen dadurch unzulässigen Schwankungen. Dauernde Änderungen in der Glaslinie führen andererseits zu verstärktem Wannensteinangriff an den Spülkanten und zu Verkleinerung der Ausbeute durch Steinchen und Schlieren. Eine Glasstandsmeßeinrichtung trägt außerdem wesentlich zu einer besseren Überwachung der Wannenführung bei, weil zu weites Absinken des Spiegels und zu schnelles Einlegen von Gemenge sofort erkannt werden. Da diese Messung jedoch in der Praxis immer noch auf große Schwierigkeiten stößt, werden für den jeweiligen Verwendungszweck geeignete Geräte meist aus der Betriebserfahrung der einzelnen Werke heraus entwickelt. Es sind schon die verschiedensten Methoden versucht und ausgeführt worden. Keramische Schwimmer und optische Vorrichtungen [39] konnten sich nicht durchsetzen. Größere Bedeutung haben dagegen folgende Verfahren erlangt:

1. Abtastung der Glasoberfläche mit einer Platinelektrode, die eine periodische Hubbewegung ausführt, oder mit einer bzw. zwei feststehenden, in verschiedener Höhe angebrachten Elektroden.

2. Ermittlung des elektrischen Widerstandes zwischen zwei in das Glas tauchenden Elektroden als Vergleichsgröße für ihre Eintauchtiefe.

3. Pneumatische Abtastung der Glasspiegelhöhe, wobei der Widerstand eines aus einer Düse gegen die Glasoberfläche blasenden Luftstromes als Maß für die Entfernung der Düse vom Glasbad dient.

4. Durchstrahlung des Glasbades in Spiegelhöhe mit Hilfe eines radioaktiven Präparates, wobei die durch den jeweiligen Glasstand mehr oder weniger geschwächte Strahlungsenergie als Meßgröße verwendet wird.

Jedes dieser Meßverfahren hat Vor- und Nachteile, durch die es nur einen jeweils begrenzten Anwendungsbereich hat. Wohl am häufigsten durchgeführt ist die Abtastung des Spiegels mit einer Platinelektrode. Sie erfolgt in Abständen von etwa 20 s durch einen mechanischen Antrieb. Berührt die Elektrode das Glas, wird ein elektrischer Stromkreis geschlossen, der den Antrieb stillsetzt. Mit dem Elektrodenantrieb ist ein Registriergerät elektrisch gekoppelt, das die jeweilige Hublänge aufzeichnet. Danach kehrt die Elektrode in ihre Ausgangslage zurück, und der Abtastvorgang beginnt von neuem.

Eine keramische Schutzarmatur als Träger der eigentlichen Elektrode setzt voraus, daß die Höhe des Gewölbes oder der Abdeckung über dem Glasbad ein gewisses Maß nicht überschreitet, da sie der Festigkeit halber nur ungern in größerer Länge als etwa 1,50 m verwendet wird. Weiter darf die Ofenraumtemperatur nicht höher als rund 1500°C sein, und an der Abtaststelle im Bad darf sich kein Schaum oder dgl. ansammeln, da sonst die Messung verfälscht wird. Aus diesen Gründen eignet sich diese Methode am besten zum Einsatz in Speiserrinnen oder eigens dafür vorgesehenen Vorbauten. Letztere müssen allerdings in vielen Fällen mit Elektroden im Glas elektrisch beheizt werden, soll das Glas nicht einfrieren. Da dies baulich kostspielig ist und einen laufenden Energieaufwand von 5—10 kW erfordert, wird diese Ausführung nur selten in Betracht gezogen.

Zur Messung der Glasstandshöhe an Schmelzwannen ohne Speiserrinnen wurde deshalb eine Elektrode an

einem Kipphelbelarm befestigt. Der Abtasthebelarm wird in einer geeigneten Öffnung des Schmelzwannenoberbaues in Höhe der Wannensteinoberkante drehbar gelagert angebracht (Bild 16). Die aus feuerfestem Material hergestellte Lagerpfanne erfordert keine Kühlung, während der die keramische Armatur tragende Hebelarm von Kühlwasser durchflossen wird. Das rechtwinklig gebogene Degussitrohr trägt an seinem wannenseitigen Ende eine Platinspitze.

Die Wahl des Einbauortes muß jeweils mit Rücksicht auf die baulichen Gegebenheiten erfolgen. Bei der Messung in Wannen wird man grundsätzlich die Arbeitswanne wegen der größeren Reinheit des Glasspiegels vorziehen. Ist dort ein Einbau nicht möglich, so schützt in vielen Fällen ein in das Glas gelegter Ring, in den die Elektrode eintaucht, vor Beeinflussung der Anzeige durch Schaum und dgl. Die beste Stelle zum Einbau der Elektrode ist jedoch eine Speiserrinne, vorausgesetzt, daß auf die Abtaststelle kein Kühlluftstrom einwirkt, da die-

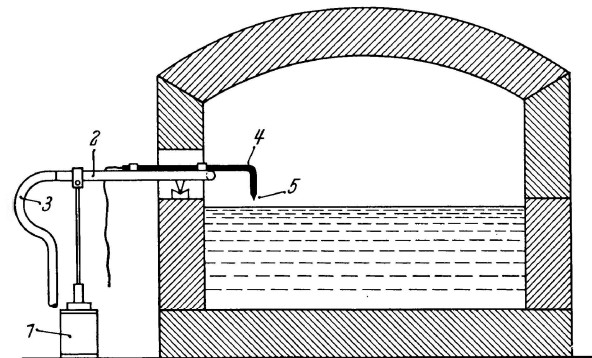


Bild 16. Abtastung des Glasstandes durch eine Kipphelbelarmelektrode (Bauart Schott & Gen.).

1. Hubmotor, 2. Kipphelbelarm, 3. Wasserschlauch, 4. Degussitrohr, 5. Platinspitze.

ser über Veränderung des Übergangswiderstandes zu Fehlmessungen führt. An der Rinne kann auch der Motorantrieb vor Wärme geschützt und gut zugänglich angebracht werden. Die Bedenken, daß bei der Messung an dieser Stelle die Totzeit für eine Regelung der Einlegemaschine zu groß würde, konnten durch die Betriebserfahrungen widerlegt werden, da der Spiegel den Einlagen in Sekundenschnelle folgt. Es können also auch bei dieser Messung einfache Regler mit gutem Erfolg eingesetzt werden. Der wesentliche Vorteil der Impuls-gabe von der Rinne her ist der, daß damit der Glasstand an derjenigen Stelle konstant gehalten wird, an der dies besonders erwünscht ist. Erfolgt der Impuls dagegen von der Schmelzwanne her, so kann sich durch die Viskosität des Glases der Stand in der Rinne je nach Durchsatz verändern, so daß ein zweiter Glasstandsregler in der Rinne erforderlich werden kann. Eine solche Einrichtung ist in den Glaswerken Ruhr AG. entwickelt worden [40].

Bei der Gestaltung der Abtastelektroden hat sich herausgestellt, daß eine verhältnismäßig spitze Form einer mehr runden vorzuziehen ist, weil sie beim Abheben vom Glasspiegel den schwächsten Glasfaden hochzieht. Da eine ungeeignete Elektrodenform beim Herausziehen aus dem Glas Bläschen hinterlassen kann, die in die Fertigung gelangen, ist diesem Punkt besondere Beachtung zu schenken. Einige Verfahren versuchen, den sich bildenden Glasfaden durch einen stärkeren Über-

gangsstrom zum Bad abzuschmelzen. Hierzu muß jedoch eine Gegenelektrode im Bad angebracht werden. Taster man dagegen mit Hilfe eines mit elektronischem Verstärker arbeitenden Relais ab, so genügt Anschluß des Gegenpoles an die Eisenteile der Wanne. Wird die Elektrode sofort bei Glasberührung abgebremst, so ist die Eintauchtiefe sehr klein, und der Glasfaden wirkt sich nicht störend für die Glasqualität und die Meßgenauigkeit aus.

Das elektronische Relais ist ungeeignet, wenn bei höheren Temperaturen der Stromfluß durch die ionisierte Gasatmosphäre eine gewisse Größe erreicht, da dann der Abtaststrom nicht mehr unterbrochen wird. Ebenso wenig ist dieses Relais bei Einsatz von Heizelektroden in der Wanne zu gebrauchen, da sich ein elektrisches Potential gegen Erde einstellt. Abhilfe bei Ionisation schafft die Verwendung einer Anlegenspannung von beispielsweise 42 Volt Wechselstrom an die Reihe Elektrode-Glasbad-Wanneneisenteile-Relais. Die

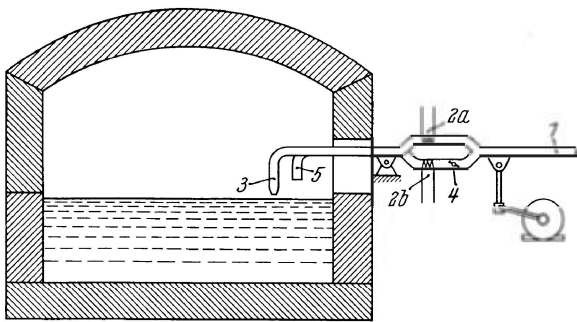


Bild 17. Prinzip der pneumatischen Abtastung des Glasspiegels [41].

1. Eintritt der Gebläseluft, 2a und 2b. Meßwiderstände für Luftmengen, 3. Ausblasöffnung über dem Glasspiegel, 4. Drosselklappe zur Lufterstellung, 5. Ausgleichsöffnung zum Ofenraum.

Gegenelektrode ist bei geeignetem Relais entbehrlich. Sie wird auch bei elektrobeheizten Wannen nicht benötigt, wenn man das elektrische Potential des Glases gegen Erde direkt zur Schaltung eines Relais mit geeigneter Spannung benutzen kann. Die Haltbarkeit der Degusschutzarmaturen ist derjenigen von Thermoelementen unter gleichen Temperaturverhältnissen vergleichbar (6–12 Monate).

Die Vorteile des Glasspiegelabtastverfahrens mittels Elektroden sind hohe Meßgenauigkeit (etwa  $\pm 0,1$  mm), einfache Montage des Glasstandfühlers an Speiserrinnen, in deren Abdeckung lediglich ein Loch von etwa 25–30 mm  $\varnothing$  vorgesehen werden muß, hohe Betriebssicherheit bei geeignetem Elektrodenantrieb, unkomplizierte Meß- und Regelgeräte. Die erfassbare Spiegelschwankung beträgt etwa  $\pm 25$  mm. Die Nachteile des Verfahrens bestehen darin, daß man, falls elektrischer Antrieb vorgesehen ist, den Motorblock und eine große Anzahl von Leitungen vor Wärme geschützt und gut zugänglich anbringen muß und daß eine gewisse Wartung sowie periodischer Ersatz der Elektrode erforderlich sind. Die Elektrodenschutzarmaturen müssen außerdem in gewissen Zeitabständen von Kondensationsansätzen freigemacht werden.

Das zweite bekannte Verfahren beruht auf der Änderung des elektrischen Widerstandes zwischen zwei fest-

stehenden, konisch ausgebildeten Elektroden bei Schwankungen des Glasspiegels. Steigt der Glasstand, so wird der Übergangswiderstand von Elektrode zu Glas durch die sich stark vergrößernde Berührungsfläche kleiner und umgekehrt. Bezüglich Einbauort und Einbaubedingungen gelten im wesentlichen die gleichen Gesichtspunkte wie für Abtastelektroden. Zu beachten ist, daß besonders bei elektrisch beheizten Schmelzwannen Spannungsgefälle an der Meßstelle Fehlmessungen ergeben, ferner daß durch Gleichstromkomponenten unter Umständen Blasen hervorgerufen werden können. Die durch Temperaturschwankungen im Glas hervorgerufenen Widerstandsänderungen müssen durch besondere Ausgleichselektroden kompensiert werden.

Die Vorteile: Fortfall bewegter Teile und des elektrischen Antriebs sowie hohe Betriebssicherheit werden durch kostspielige Elektroden, schwierigeren Einbau und vorgenannte grundsätzliche Nachteile aufgewogen. Der größte Meßbereich dürfte bei  $\pm 5$  mm liegen. Betriebserfahrungen und Meßgenauigkeit sind nicht bekannt geworden.

Zur Beurteilung der Einsatzmöglichkeit der verschiedenen Spielarten der pneumatischen Meßmethode ist ebenfalls die Kenntnis der Wirkungsweise nötig. Den grundsätzlichen Aufbau des pneumatischen Teiles einer

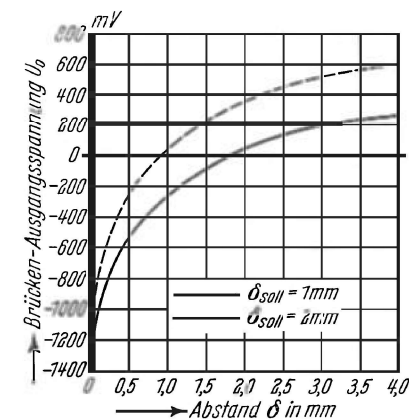


Bild 18. Abhängigkeit des Meßwertes vom Abstand Düse-Glas bei der pneumatischen Glasstandsmessung [41].

strom am Meßwiderstand 2a ebenfalls ändern, wodurch eine Meßbrücke zum Ansprechen gebracht wird. Es ist verständlich, daß in einer gewissen Entfernung des Glases von der Düse die Luftmenge ein Maximum erreicht. Der für die Messung brauchbare Bereich liegt in einem Abstand der Düse vom Glas von etwa  $\pm 1$  mm, der größtmögliche Meßabstand beträgt 4 mm (Bild 18).

Das Verfahren ist vorwiegend zur Anwendung in Schmelz- und Arbeitswannen, kaum jedoch für Speiserrinnen geeignet, da es eine größere seitliche Arbeitsöffnung verlangt und das Anblasen des Spiegels einen Streifen kalten Glases verursacht, der erfahrungsgemäß schwer wieder auszugleichen ist und damit Temperaturschlieren im Fertigerzeugnis hervorrufen kann. Außerdem dürfte bei Verwendung von geregelter Kühlluft in der Rinne die Messung empfindlich gestört werden. Ob die durch das Verfahren bedingte örtliche Abkühlung des Glasspiegels in der Schmelzwanne zu unerwünschten Nebenerscheinungen führt (z. B. Oberflächenpelz verursacht), ist nicht bekannt geworden.

Bei reduzierend erschmolzenen Gläsern dürfte die Methode nicht anwendbar sein.

Es sind zwei Ausführungsarten bekannt geworden, nämlich die Verwendung einer feststehenden Sonde und einer Nachlaufsonde. Da die erstere nur für Glasstandsänderungen von etwa  $\pm 1$  mm brauchbar und infolgedessen schwer in Betrieb zu nehmen ist und bei nicht zu vermeidendem, unbeabsichtigtem Steigen des Glasstandes völlig versagt und ausgebaut werden muß, ist ihre Anwendung im praktischen Betrieb mit Schwierigkeiten verbunden. Die Nachlaufsonde vermeidet diese Nachteile dadurch, daß sie über die vorerwähnte Meßbrücke durch ein Stellgetriebe stets so nachgestellt wird, daß die ausströmende Luftmenge aus Düse 3 und damit auch ihr Abstand von der Glasoberfläche konstant bleibt. Als Maß des Glasstandes dient der Stellweg der Sonde, der auf ein Registriergerät übertragen wird.

Als Vorteile des Verfahrens werden große Betriebssicherheit, robuste Ausführung und sehr geringe Wartung bei hoher Meßgenauigkeit angeführt. Als Nachteile müssen neben den obenerwähnten grundsätzlichen Beschränkungen in der Verwendbarkeit genannt werden:

1. Anbau eines verhältnismäßig komplizierten und umfangreichen Steuergerätes in Nähe der heißen Seitensteine mit ihren Kühldüsen und Verspannungseisen;

2. Verwendung von Wasserkühlung in der Wanne;

3. Gefahr des Verglasens bei unbeabsichtigter Glasberührung und des Anwachsens von Kondensationsprodukten um die Düse;

4. großer apparativer Aufwand.

Die Messung des Glasstandes mit Hilfe von radioaktiven Präparaten beruht auf folgendem physikalischem Tatbestand: Radioisotope, wie z. B. Kobalt (Co 60), gehen im Laufe der Zeit unter vorwiegender Aussendung von  $\gamma$ -Strahlen in die beständige Atomart, hier Co 59, über. Die  $\gamma$ -Strahlen lösen in einem Geiger-Müller-Zählrohr Impulse aus, deren Anzahl von der Stärke der Bestrahlung abhängt. Bringt man in den Strahlengang ein Hindernis, beispielsweise flüssiges Glas, so wird die Strahlung geschwächt, und zwar um so mehr, je weniger Strahlen den Zähler noch erreichen, d. h. je höher der Glasstand steigt, wodurch die Anzahl der Impulse entsprechend zurückgeht. Ein elektronischer Verstärker integriert diese Impulszahl über eine einstellbare Zeitspanne und bringt sie als elektrischen Strom zur Registrierung. Die Anzeige steht also in einem direkten Zusammenhang mit der Höhe des Glasstandes. Man benötigt demnach:

1. ein radioaktives Präparat, in der Regel Co 60, mit einer Stärke von etwa 40 mC (Milli-Curie), das mit einem Bleimantel von etwa 100 mm Dicke abgeschirmt ist;

2. ein  $\gamma$ -Strahlenmeßgerät (Geiger-Müller-Zähler oder Scintillationszähler);

3. einen elektronischen Verstärker mit Anzeiger oder Registriergerät bzw. Regler.

Da die Strahlung mit dem Quadrat der Entfernung zwischen Sender und Empfänger abnimmt, muß die Strahlungsleistung des Präparats entsprechend der Entfernung erhöht werden. Es gibt deshalb einen Abstand, der ohne Gefährdung der Umgebung nicht überschritten werden darf. Beim Einsatz der Meßeinrichtung an Glasschmelzwannen liegt diese Grenze bei etwa 1,50 m, mit Berücksichtigung einer Wannensteinstärke von

2  $\times$  200 mm. Damit ist die Anwendung des Verfahrens vorwiegend auf Speiserrinnen und Unitmelter beschränkt. Da zur Installation des Meßfühlers keinerlei Veränderungen an Ofenbauteilen vorgenommen werden müssen, kann der Anbau praktisch an jeder Stelle erfolgen, bei Unitmeltern allerdings nicht in Nähe der Einlegezone. Vorzuziehen ist für den Strahler eine Stelle, die vom Personal nicht zu häufig begangen werden muß. Die zulässigen Aufenthaltszeiten betragen beispielsweise bei Co 60 von 40 mC in 3 m Abstand 48 Stunden je Woche, in 1,4 m 10 Stunden und in 0,6 m 2 Stunden.

Sender und Empfänger werden vorteilhaft auf Schlitten angebracht, die in der Höhe einstellbar und mit Skalen versehen sind (Bild 19). Ihre Nullstellung wird so gewählt, daß die Verbindungslinie Mitte Strahler-Mitte Empfänger waagrecht liegt. Dadurch ist eine Eichung des Gerätes bei konstantem Glasstand möglich, indem zu jeder Höhenänderung beider Schlitten der entsprechende Ausschlag am Registriergerät bestimmt wird. Das Radioisotop kann ungekühlt angebracht werden,

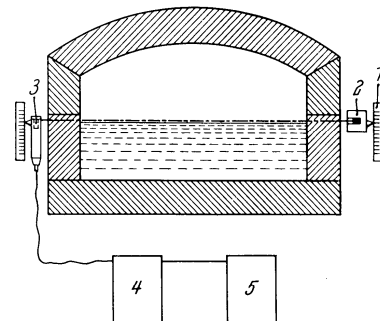


Bild 19. Anordnung von Strahler und Strahlungsempfänger bei der radioaktiven Glasstandsmessung.

1. Einstellskalen, 2. Kobaltpräparat, 3. Scintillationszähler mit Vorverstärker, 4. Verstärker, 5. Registrier- und Regelgeräte.

sofern der Bleimantel nicht schmilzt. Der Empfänger dagegen muß mit Wasserkühlung versehen sein.

Die Vorteile dieser Meßmethode sind:

1. Fortfall bewegter Teile.
2. Montage ohne jegliche Veränderungen an Ofenbauteilen, auch während des Betriebes.
3. Betriebssichere Schutzmöglichkeit aller empfindlichen Teile, geringe Wartung.
4. Möglichkeit von Registrierung und Regelung.

Dem stehen folgende Nachteile gegenüber:

1. Beschränkter Meßbereich (praktisch  $\pm 5$  mm).
2. Notwendigkeit einer Eichung am Einbauort wegen der nichtlinearen Abhängigkeit des Ausschlages am Registriergerät von dem Glasstand (Bild 20).
3. Nacheichung in Zeitabständen von 3 bis 4 Monaten, da die Strahlungsintensität bei einer Halbwertszeit von 5,3 Jahren etwa um 1% in 24 Tagen abnimmt.

4. Die erreichbare Meßgenauigkeit beträgt normalerweise 3%, höchstens aber 2% des Meßbereiches, d. h. selbst bei einem eingegengten Bereich von  $\pm 4$  mm muß man mit Abweichungen von  $\pm 0,25$  mm rechnen. Das entspricht einer Regelgüte von etwa  $\pm 0,4-0,5$  mm, was für manche Speiser für ungenügend erachtet wird.

5. Durch das Eintreffen der Impulse nach den Gesetzen der Statistik ist man gezwungen, sie über eine gewisse Zeit, meist 20–40 s zu integrieren, wodurch eine An-

zeigeverzögerung, also praktisch eine Totzeit in gleicher Größenordnung entsteht. Dadurch wird die Regelung erschwert und die Regelabweichung größer.

6. Der Umgang mit radioaktiven Isotopen ist nicht ungefährlich und die Benutzung meldepflichtig. Geschultes Personal ist erforderlich.

Näheres über radioaktive Isotope und die Praxis ihrer Anwendung in der chemischen und glasverarbeitenden Industrie ist im Schrifttum [42, 43] zu finden. Zusammenfassend ist festzustellen, daß diese Art der Glasstandsmessung überall angebracht ist, wo man mit einfachen Mitteln und geringem Aufwand eine fast war-

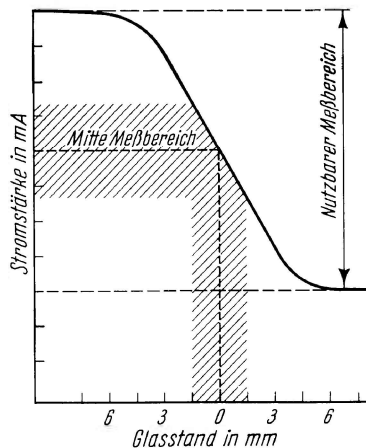


Bild 20. Abhängigkeit des Meßwertes vom Glasstand bei radioaktiven Glasstandsmessern [43].

tungsfreie Messung erreichen will, jedoch keine zu hohe Ansprüche an die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit stellt, also vorwiegend im Handbetrieb und bei unempfindlicher Maschinenfertigung.

## 5. Kammerumsteuerung

### 5.1. Schmelzwannen

Das Bestreben, die Schmelzleistung von Wannen zu steigern und gleichzeitig den spezifischen Brennstoffverbrauch zu vermindern, hat vielfach zur selbsttätigen Kammerumsteuerung geführt. Ihre Vorteile sind: Gleichmäßiger Ofengang durch gleichbleibende Luftwärmung und Auftriebsverhältnisse, kürzere Beheizungsphasen, einfachere Bedienung und Ausschaltung von Bedienungsfehlern. Nach [27] sind für die Sekunden, die vergehen bis sich nach dem Umsteuern wieder einwandfreie Verbrennungsverhältnisse einstellen, fast ebenso viele Minuten nötig, um den Temperaturabfall im Ofeninnern auszugleichen. Man muß daher bestrebt sein, diese Zeit möglichst abzukürzen. Da der größte Teil der Umsteuerzeit dazu benötigt wird, die Verbrennungsluft durch die zuvor vom Abgas durchströmten Kammern an den Brennermund zu bringen, erzielt man eine wesentliche Verbesserung des Wechselsvorganges durch:

1. Umlegen von Luft- und Abgaswechsel mit oder sofort nach Einstellung der Brennstoffzufuhr.
2. Öffnen des Ofendruckstellgliedes, das normalerweise vom Herdraumdruckregler infolge Abfallens des Herdraumdruckes geschlossen würde.
3. Vorübergehendes volles Öffnen der Verbrennungsluftdrosselklappe sofort nach dem Luftwechsel zur Beschleunigung der Luftspülung der Kammern.

4. Vorübergehende Erhöhung der Menge des Zerstäubungsmediums bei Ölfeuerung.

5. Allmählichen Beginn der Brennstoffzufuhr so früh als möglich.

Es gelang durch diese Maßnahmen, die Umsteuerzeit von 45 s auf 10 s zu verkürzen, wodurch eine Brennstoffersparnis von 3 bis 8% eintrat [27].

Die Wahl eines selbsttätigen Umsteuersystems wirft die Frage nach der Art der Auslösung des Wechselsvorganges auf. Für das Umsteuern nach Zeit, wie es im Handbetrieb fast allgemein üblich ist, spricht die Einfachheit. Es genügt ein Zeitschaltwerk, dessen Halbperioden so einzustellen sind, daß auch einseitig gehende Öfen auf annähernd gleichen Kammertemperaturen beider Seiten gehalten werden können. Von außen kommende Einflüsse sind allerdings nicht zu erfassen. Das Umsteuern nach den Kammertemperaturen [44] schaltet diese Störgrößen aus. Die dazu notwendigen Temperaturfühler bringt man aus Haltbarkeitsgründen meist in den Sammelkanälen für die Abgase jeder Ofenseite an. Nachteilig wirkt sich bei diesem System aus, daß Belastungsänderungen zu sehr verschiedenen Umsteuerzeiten führen,

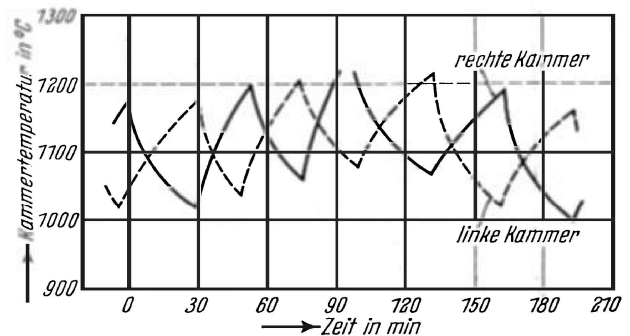


Bild 21. Verlauf der Kammertemperatur bei wechselnder Ofenlast [12].

da eine eingestellte Abgastemperaturhöhe bei größerer Belastung schneller erreicht wird und umgekehrt. Man wird deshalb diese Umsteuerungsart nur bei Öfen mit geringen Durchsatzänderungen und in Verbindung mit einem Zeitschaltwerk anwenden, das verhindert, daß die Periodendauer eine bestimmte Zeit überschreitet.

Der genannte Nachteil wird durch das Wechseln nach der Temperaturdifferenz zwischen der jeweils heißen und kalten Kammer vermieden. Dabei paßt sich die Periodendauer der Ofenbelastung an. Dieses Verfahren hat sich auch bei Hafenöfen mit stark wechselnden Gasemengen bewährt [12]. Bild 21 zeigt schematisch den Verlauf der Kammertemperaturen eines derart umgesteuerten Ofens bei wechselnder Belastung.

Schließlich ist noch ein Vorschlag zu erwähnen, der darauf abzielt, das Wärmespeichervermögen der Kammern optimal auszunutzen. Danach wäre für die Auslösung des Umsteuerungsvorganges die Temperaturänderungsgeschwindigkeit der Gittersteine heranzuziehen und somit nach der „Wärmesättigung“ der Steine zu wechseln. Da der erforderliche Geräteaufwand jedoch sehr hoch ist, wurde dieses Verfahren noch nicht praktisch erprobt.

### Schrifttum

(Schrifttumsverzeichnis wird anschließend an Teil II veröffentlicht.) (32464)