

C. Brenntechnische Eigenschaften.

a) Durchschnittliche Zusammensetzung der technischen Brenngase
(nach K. Bunte, GWF 74, 941, 1931).

Art des Gases		Leucht- gas	Stein- kohlen- gas	Kokereif- gas	Wasser- gas	Normen- gas der Vor- kriegszeit	Stadtgas Normen- gas	Stein- kohlen- wasser- gas	Ölkarbu- riertes Wasser- gas	Gene- ratorgas	Gichtgas	
Verbrennungswärme (oberer Heizwert)	kcal/Nm ³	5900	5500	4650	2700	5060	4300	3100	3970	1280	950	
Heizwert (unterer)	kcal/Nm ³	5260	4900	4130	2460	4530	3830	2800	3620	1215	940	
Gaszusammensetzung	CO ₂	%	2	2,0	2,1	6,8	2,8	4,0	5,0	6,0	5,9	7,5
	sKW	%	4	3,5	2,1	—	2,9	2,0	0,2	3,8	—	—
	CO	%	8	8,5	6,2	38,5	16,6	21,5	34,5	33,5	28,5	29,0
	H ₂	%	50	52,5	53,3	49,5	50,0	51,5	48,5	44,5	12,8	2,5
	CH ₄	%	34	30,0	25,0	0,2	25,1	17,0	5,5	8,0	0,3	—
	N ₂	%	2	3,5	11,3	5,5	2,6	4,0	6,3	4,2	52,5	61,0
Spez. Gewicht (Luft = 1)		0,41	0,40	0,41	0,56	0,44	0,47	0,54	0,58	0,88	0,99	
je m ³ Gas												
Sauerstoffbedarf	m ³	1,15	1,06	0,893	0,44	0,966	0,795	0,534	0,72	0,21	0,16	
Luftbedarf (Mindestluftmenge)	m ³	5,50	5,09	4,27	2,12	4,62	3,81	2,55	3,45	1,01	0,75	
Rauchgasmenge feucht	m ³	6,23	5,80	4,98	2,68	5,30	4,45	3,14	4,08	1,81	1,59	
Rauchgasanalyse	CO ₂	%	9,0	8,8	8,0	16,9	10,0	10,9	14,5	14,5	19,2	23,0
	H ₂ O	%	20,9	21,2	22,0	18,6	20,5	20,6	19,1	17,6	7,4	1,6
	N ₂	%	70,1	70,0	70,0	64,5	69,5	68,5	66,4	67,9	73,4	75,4

b) Technische Gase.

(Brenngase.)

Gruppe	Gewinnung	Art	Unterarten	Heizwert kcal/Nm ³	Sonstiges	
Gase aus festen Brennstoffen	Entgasung	Schmelgase	Holz-, Torf-, Braunkohlen-, Steinkohlen-, Ölschiefer-schmelgas	3000—10000	Schmelgase werden aus festen Brennstoffen durch Erhitzen unter Luftabschluß unterhalb Rotglut (500—800°) erhalten.	
		Destillationsgase	Torf-, Braunkohlen-, Steinkohlen-gas (Kokereigas)	3500—5500	Destillationsgase entstehen aus festen Brennstoffen oberhalb Rotglut.	
	Vergasung	mit Luft (Schwachgase)	Gichtgas		700—900	Entweicht aus der Gicht des Hochofens und besteht aus Kohlensäure, Kohlenoxyd und Stickstoff.
			Mondgas		800—1500	Mondgas wurde früher durch Vergasung jüngerer Kohlen mit Luft in Gegenwart von überschüssigem überhitztem Wasserdampf bei möglichst niedriger Temperatur zwecks erhöhter Ammoniakgewinnung erzeugt.
			Generatorgas		800—1500	Generatorgas entsteht bei der Vergasung fester Brennstoffe mit Luft, zumeist bei gleichzeitiger Dampfungabe.
		mit Wasserdampf (Wassergase)	Koks-wassergas		2500—2900	Wassergas wird erzeugt durch Einblasen von Dampf in hochoverhitzten Koks. Das Aufheizen des Brennstoffs erfolgt zumeist regenerativ (Blasen), in neuester Zeit auch rekuperativ.
			Karburiertes Wassergas		3000—4500	Karburiertes Wassergas entsteht entweder durch Vergasung von Stein- oder Braunkohle mit Wasserdampf (Kohlenwassergas), so daß ein Gemisch von Schmelgas und Wassergas gebildet wird oder durch das Vermischen von Wassergas mit den Krackgasen von Ölen oder Teeren, die entweder mit dem Wasserdampf zusammen oder nach der Wassergasbildung in einem Karburator eingespritzt und in diesem zersetzt werden.

Gruppe	Gewinnung	Art	Unterarten	Heizwert kcal/Nm ³	Sonstiges
Gase aus festen Brennstoffen	Vergasung	mit Sauerstoff		3000—4500	Durch Vergasen von Koks mit Sauerstoff wird technisch reines (98 Proz.) Kohlenoxyd, von Kohle mit Sauerstoff-Wasserdampf-Gemisch-Synthesegas (Kohlenoxyd-Wasserdampf-Gemisch) oder unter Druck (Lurgiverfahren) ein stadtgasähnliches Gas erhalten.
Erdgase	Entstehung ohne technische Einwirkung	—	Trockenes Erdgas	7000—9000	Enthält an Kohlenwasserstoffen im wesentlichen nur Methan.
			Nasses Erdgas	7000—15000	Enthält neben Methan erhebliche Mengen Äthan, Propan, Butan (Flüssiggas) und höhere Kohlenwasserstoffe (Gasolin).
Flüssig-gase	Aus nassem Erdgas, aus Destillations- und Crackgasen, aus Koksofengas oder Nebenprodukt bei Synthesen flüssiger Brennstoffe	—	Gasol	13000—18000	Gasol besteht je etwa zur Hälfte aus gesättigten und ungesättigten Kohlenwasserstoffen, die bei nur mäßig erhöhtem Druck verflüssigt und in Leichtmetallflaschen aufbewahrt werden.
			Propan und Butan	22000—28000	Propan- und Butangas werden bei nur wenig erhöhtem Druck verflüssigt und dienen als Heizgas oder zum Betrieb von Kraftfahrzeugen.
Sonstige Gase	Verschiedene Verfahren	Methan	Methan rein	9500	Reines Methan fällt bei der Tiefkühlung von Steinkohlengas an.
			Klärgas	6000—7000	Bei der biologischen Abwasserklärung wird Methan gebildet, das zunächst durch Schwefelwasserstoff und Kohlendioxyd verunreinigt ist.
		Kohlenoxyd	—	3000	Kohlenoxyd wird erhalten durch trockene Vergasung von Hochtemperaturkoks mit technisch reinem Sauerstoff.
		Wasserstoff	—	3000	Wasserstoff wird erhalten durch Tiefkühlung von Steinkohlengas, durch Konvertierung des Kohlenoxyds in Kohlenoxyd-Wasserstoffgemischen mit Wasserdampf, durch thermische Zersetzung von Kohlenwasserstoffen (Methan) unter Kohlenstoffausscheidung, durch Behandeln von reduziertem Eisen bei Rotglut mit überhitztem Wasserdampf (als Regenerativverfahren) und durch Elektrolyse.

Gruppe	Gewinnung	Art	Unterarten	Heizwert kcal/Nm ³	Sonstiges
Sonstige Gase	Verschiedene Verfahren	Azetylen	—	14000	Azetylen wird gebildet durch Zersetzung von Kalziumkarbid mit Wasser oder durch thermisches kurzzeitiges Erhitzen von Kohlenwasserstoffen (Methan).
		Destillations- und Krackgase	Destillationsgase	12000—18000	Destillationsgase werden bei der Destillation von Teeren und Ölen abgespalten.
			Krackgase	15000—20000	Krackgase entstehen bei der thermischen Zersetzung von höhermolekularen Kohlenwasserstoffen (Krackung) zu Benzin als Nebenerzeugnis.
Gase aus flüssigen Brennstoffen	Durch Verdampfung	Kaltluftgase	Benzin-Luftgas Benzol-Luftgas	2000—3500	Kaltluftgase werden erhalten durch Beladen von Luft mit Benzin- oder Benzoldämpfen bis oberhalb der oberen Explosionsgrenze.
		Spaltgase	Ölgas	8000—11000	Ölgas wird erzeugt durch Zersetzung von Gasöl oder Erteer im Regenerativ- oder Rekuperativverfahren bei etwa 700—800°.

Allgemeine Betriebsbezeichnungen.

Art	Unterart	Bemerkungen
Rohgas	—	Ungereinigtes Gas (Produktionsgas)
Betriebsgas	—	Teilweise gereinigtes Gas
Reingas	—	Vollständig gereinigtes Gas, bei Generatorgas auch Kaltgas genannt.
Stadtgas	Steinkohlengas, Koksofengas, Braunkohlengas oder Gemische derselben mit Wassergasen, Schwachgasen oder sonstigen.	Stadtgas, früher als Leuchtgas bezeichnet, dient zur Versorgung von Haushalt, Gewerbe und Industrie mit gasförmigem Brennstoff.
Ferngas		
Zechengas (Kokereigas) .		

c) Deutsche Richtlinien für die normale Beschaffenheit des Stadtgases.

Als Richtlinien für die Gasbeschaffenheit, die für deutsche Gaswerke als normal zu gelten haben und für welche die Gasgeräte gebaut

werden, hat der DVGW auf seinen Jahresversammlungen in Krummhübel (GWF 1921, S. 857), Köln (GWF 1925, S. 387), Kassel (GWF 1927, S. 639, 797) folgende aufgestellt:

Das von den Gaswerken abzugebende Mischgas soll als normal betrachtet werden, wenn es einen oberen Heizwert von 4000 bis 4300 kcal/m³ (0°, 760 Torr. trocken) besitzt. Dieser Heizwert soll durch Zusatz brennbarer Gase zum Steinkohlengas und nicht durch übermäßige Beimischung von stickstoff- und kohlenäurereichen Gasen (Rauchgas, Generatorgas) erreicht sein.

Das spezifische Gewicht des Mischgases (Luft = 1) soll 0,5 nicht überschreiten.

Sowohl für das gekennzeichnete Mischgas, als auch für Steinkohlengas sollte nicht über einen Gehalt von 12% unbrennbarer Gase (Kohlensäure und Stickstoff) hinausgegangen werden (Bestimmungs-genauigkeit für Inertgas < 0,2%).

Sauerstoffgehalt. Zulässiger Gehalt keinesfalls über 0,5%, tunlichst nicht über 0,2 Vol.-%.

Reinheit von Schwefelwasserstoff, Ammoniak und Teer ist unbedingt zu fordern.

Schwefelwasserstoff soll quantitativ entfernt sein. (Mit Rücksicht auf eine nachträgliche Bildung von H₂S in langen Leitungen und auf die Wirtschaftlichkeit bestimmter Reinigungsverfahren kann bei Fernlieferungen im äußersten Fall ein Gehalt von 2 g/100 m³ zugelassen werden.)

Ammoniak muß bis auf 0,5 g/100 m³ entfernt sein.

Naphthalin: Im Interesse gesicherter Fortleitung muß der Naphthalin Gehalt unter 5 g/p je 100 m³ betragen, wobei p den Anfangsdruck in at bedeutet.

Unerlässlich ist es vor allem, daß jedes Gaswerk dauernde Gleichmäßigkeit seines Gases in bezug auf Heizwert, spez. Gewicht und Druck anstrebt. Als Anforderungen an die Gleichmäßigkeit der Gaszusammensetzung gelten:

Heizertschwankungen: a) des absoluten Heizwertes um nicht mehr als ± 25 kcal; b) der Meßergebnisse ± 75 kcal; Spezifisches Gewicht: Zulässige Schwankungen a) des absoluten Wertes $\pm 0,012$; b) der Meßergebnisse $\pm 0,015$. (Das spez. Gewicht ist auf trockenes Gas gegenüber trockener Luft von 0°, 760 mm zu beziehen.)

Wird auf Konstanz der Wobbe-Zahl $= \frac{\text{ob. Heizwert}}{\sqrt{\text{Dichte}}} = k$ gearbeitet, so kann eine Schwankung von k um 1,5% zugelassen werden.

Die vorstehenden Richtlinien legen brenntechnische Eigenschaften des Stadtgases noch nicht fest.

Für die Beurteilung des brenntechnischen Gebrauchswertes haben Czako und Schaak¹⁾ daher zunächst die Messung der Ottzahl vorgeschlagen, wobei die zulässigen Schwankungen des Flackerpunktes ± 2 und des Rückschlagpunktes $\pm 2,5$ Skalenteile nicht überschreiten sollen. Eine verbesserte Ausführungsform dieses Gerätes stellt der Prüfbrenner²⁾ der obengenannten Verfasser dar.

Eine praktische Vergleichszahl für den brenntechnischen Gebrauchswert stellt ferner die Verbindung der Ottzahl mit der Wobbezahl zu der Czakoschen Kennziffer dar:

$$\text{Kennziffer} = \frac{\text{Wobbezahl}}{\text{Ottzahl (Prüfbrennerzahl)}}$$

Vorschläge für eine Erweiterung der Richtlinien nach brenntechnischen Gesichtspunkten durch Einbeziehung der spezifischen Flammenleistung haben Brückner und Lühr³⁾ ausgearbeitet.

d) Richtlinien für die Gasbeschaffenheit in anderen Ländern.

Dänemark.

Allgemeine Richtlinien für die Gasbeschaffenheit bestehen nicht; der obere Heizwert beträgt zumeist 4500 bis 5000 kcal/Nm³.

Frankreich.

Der obere Heizwert soll 4500 kcal/Nm³ betragen. Der Kohlenoxydgehalt soll 15% nicht überschreiten. Das Gas soll praktisch frei von Schwefelwasserstoff sein.

Großbritannien.

Das Stadtgas soll frei von Schwefelwasserstoff sein (Prüfung mit Bleiazetatpapier).

Der Heizwert des abgegebenen Stadtgases muß öffentlich (in der Gazette von London, Edingburgh oder Dublin) bekanntgemacht werden (Bezugsbasis B. Th. U./cbf. bei 15,5°C, 762 Torr, feucht): Das Gas soll sicher brennen und einen guten thermischen Wirkungsgrad erhalten lassen. Der niedrigste zulässige Gasdruck im Rohrnetz darf 25 mm nicht unterschreiten.

Holland.

Zur Verteilung gelangt Mischgas (Steinkohlengas + karburiertes oder Blauwassergas).

¹⁾ GWF 76, 153 (1933).

²⁾ Hersteller Pollux G. m. b. H., Ludwigshafen a. Rh.

³⁾ GWF 79, 17 (1936).

Beurteilungswerte für das Stadtgas:

	sehr niedrig	niedrig	ziemlich niedrig	durchschnittlich	ziemlich hoch	hoch	sehr hoch
Oberer Heizwert kcal/m ³ (15, 760 tr.)	< 4000	4000—4050	4050—4150	4150—4300	4300—4500	4500—4700	> 4700
Inertgasgehalt % ₁₀ (N ₂ + CO ₂)	< 7	7—9	9—11	11—15	15—18	18—21	> 21
Sauerstoffgehalt % ₁₀	< 0,11	0,11—0,17	0,18—0,24	0,25—0,34	0,35—0,44	0,45—0,54	> 0,54
Spez. Gewicht (Luft = 1)	< 0,400	0,40—0,44	0,44—0,48	0,48—0,51	0,51—0,54	0,54—0,56	> 0,56
Schwefelgehalt g/100 m ³	< 10	10—14	15— 21	25—34	35—44	45—59	> 59
Ammoniakgehalt g/100 m ³	< 0,10	0,10—0,19	0,20—0,29	0,30—0,39	0,40—0,49	0,50—0,59	> 0,59

In einem Versorgungsgebiet zulässige Schwankungen im

	Heizwert ± kcal/m ³	spez. Gewicht ±
sehr gering	< 20	< 0,01
gering	20 bis 29	0,01 bis 0,013
ziemlich gering	30 » 39	0,014 » 0,017
durchschnittlich	40 » 54	0,018 » 0,022
ziemlich hoch	55 » 64	0,023 » 0,026
hoch	65 » 75	0,026 » 0,03
sehr hoch	< 75	< 0,03

Das Gas soll praktisch frei von Schwefelwasserstoff sein. Bei einer Prüfung mit Bleiazetatpapier (hergestellt durch Tränken von Filtrierpapier mit einer 6,5proz. Bleiazetatlösung) darf innerhalb 5 Minuten eine Braunfärbung erkennbar sein (Strömungsgeschwindigkeit des Gases > 100 l/h).

Festlegungen über die zulässige Höhe des Gehaltes des Gases an Sauerwasserstoff bestehen nicht.

Der Naphthalinengehalt des Gases soll zwei Drittel des Sättigungsdruckes der mittleren Rohrnetztemperatur nicht überschreiten.

Zulässiger Naphthalinengehalt des Stadtgases (g/100 m³).

Januar 4	April 8	Juli 16	Oktober 8
Februar 4	Mai 10	August 16	November 4
März 4	Juni 14	September 15	Dezember 4

Bei einer Verdichtung des Gases soll der Naphthalinengehalt umgekehrt proportional der Druckerhöhung in at erniedrigt werden.

Der Gasdruck des Versorgungsnetzes soll betragen:

$$p \text{ (mm WS)} = 45000 \frac{\sqrt{100 \gamma}}{c}$$

γ = spezifisches Gewicht des Gases $c = H_0$ kcal/m³ (15, 760 tr.).

Normaler Druck im Rohrnetz.

Ob. Heizwert des Gases kcal/m ³ (15, 760 tr.)	Spezifisches Gewicht des Gases											
	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,54	0,56	0,58	0,60
4000	69	70	73	75	76	78	80	81	83	84	86	87
4050	68	70	72	74	75	77	79	80	82	83	85	86
4100	68	69	71	73	74	76	78	79	81	82	84	85
4150	67	69	70	72	73	75	77	78	80	81	83	84
4200	66	68	69	71	73	74	76	77	79	80	82	83
4250	65	67	69	70	72	73	75	76	78	79	81	82
4300	65	66	68	69	71	72	74	75	77	78	80	81
4350	64	65	67	69	70	72	73	74	76	77	79	80
4400	63	65	66	68	69	71	72	74	75	76	78	79
4450	62	64	66	67	69	70	71	73	74	76	77	78
4500	62	63	65	66	68	69	71	72	73	75	76	77
4550	61	63	64	66	67	68	70	71	73	74	75	76
4600	60	62	63	65	66	68	69	70	72	73	74	77
4650	60	61	63	64	66	67	68	70	71	72	74	75
4700	59	60	62	63	65	66	68	69	70	72	73	74

Schweiz.

Der durchschnittliche obere Heizwert des abgegebenen Gases, berechnet auf 0°, 760 mm Barometerstand, trocken, soll 5000 kcal betragen und möglichst wenig schwanken.

Die Zusammensetzung des Gases soll möglichst gleichmäßig sein. Der durchschnittliche Gehalt an Kohlensäure, Stickstoff und Sauerstoff soll zusammen nicht mehr als 12% betragen.

Das Gas soll praktisch ammoniak- und schwefelwasserstofffrei sein.

Bei Meinungsverschiedenheiten ist der Durchschnitt während einer Periode von mindestens vier Tagen zu bestimmen.

Vereinigte Staaten von Nordamerika und Kanada.

Zur Stadtgasversorgung werden folgende Gase herangezogen:

Gasart	ob. Heizwert kcal/m ³	spez. Gewicht	Verteilungs- druck mm WS
Erdgas	10000	0,65	178
Koksofengas	4760	0,38	89
Karburiertes Wassergas	3560	0,70	89
Propan	22200	1,55	280
Butan-Luft-Gas	4670	1,16	127

Das Gas soll praktisch frei sein von Schwefelwasserstoff, der Gehalt an organisch gebundenem Schwefel soll 68,5 g/100 m³, an Ammoniak 22,9 g/100 m³ nicht überschreiten.

e) Durchschnittliche chemische Zusammensetzung der festen Brennstoffe (auf asche- und wasserfreie Substanz bezogen).

Brennstoff	C %	H %	O %	N %	S %	Flücht. Bestand- teile %	Heizwert kcal/kg
Holz	48—52	5,8—6,2	43—45	0,05—0,1	—	70—78	4500—4800
Torf							
Fasertorf	49—52	5—6	40—45	1	0,1—1	55—60	5000—5400
Modertorf	52—58	6—7	32—40	2—3	0,1—1	50—55	5200—5600
Lebertorf	57—60	6—8	28—35	3—4	0,1—1	45—50	5500—5800
Braunkohle							
Erdige Braunkohle	65—70	5—8	18—30	0,5—1,5	0,5—3	45—60	7200—7400
Lignit	65—70	5—6	25—30	0,5—1,5	0,5—3	35—50	6200—6700
Pechkohle	73—76	5,5—7	12—18	1—2	0,5—3	40—75	7000—8600
Steinkohle							
Flammkohle	75—80	4,5—5,8	15—20	1—1,5	0,5—1,5	40—55	7600—7800
Gasflammkohle	80—85	5,0—5,8	10—15	1—1,5	0,5—1,5	35—45	7800—8300
Gaskohle	82—86	5—5,5	8—12	1—1,5	0,5—1,5	30—38	8300—8600
Kokskohle	85—88	4,5—5,5	6—10	1—1,5	0,5—1,5	18—32	8600—8700
Eßkohle	87—90	3,5—5,0	4—6	1—1,5	0,5—1,5	12—18	8600—8700
Magerkohle	90—94	3—4,5	3—4	1	0,5—1	8—12	8700
Anthrazit	94—97	1—2,5	1—2	0,5—1	0,5	1—5	8700—8750

f) Einteilung der Steinkohlen nach der Koksbeschaffenheit.

Nach Aussehen des Kokes	Sonstige Bezeichnung der Kohlen	Koksbeschaffenheit
Backkohle	Kokskohle, Gaskohle	geschmolzen, gebläht
Backende Sinterkohle	Eßkohle, Gasflammkohle	gesintert bis geschmolzen zuweilen etwas gebläht
Sinterkohle	Gasflammkohle	gesintert, nicht gebläht
Gesinterte Sandkohle	Magerkohle, Flammkohle	schwach gesintert
Sandkohle	Anthrazit, Flammkohle	pulverig

g) Petrographische Bestandteile der Steinkohle.

Bezeichnung	Kennzeichen	Verkokungsverhalten	
Glanzkohle	Vitrit	ebener, kantiger oder muscheliger Bruch	
		gut verkokungsfähig	
Mattkohle	Clarit	mattes Aussehen, unregelmäßiger Bruch	
	Durit		mäßig verkokungsfähig
Übergangsstufen	Halbfusit	mikroskopisch als Einschlüsse und Einlagerungen erkennbar	
	Opakmasse		wenig verkokungsfähig
	Harzeinschlüsse		
Faserkohle	Fusit	holzkohleähnliche Struktur	
		bleibt nahezu unverändert	
Mineralbestandteile	Brandschiefer	> 20% Mineralbestandteile	
	Berge		

h) Durchschnittliche Zusammensetzung von Koks (wasserfrei).

Koks	C %	H %	O + N %	S %	Asche %
Kammerofenkoks	86—90	0,3—0,4	1,4—1,9	0,5—0,8	6—10
Retortenkoks	84—88	0,3—0,4	1,4—1,9	0,5—0,8	6—10
Hochofenkoks	86—90	0,3—0,4	1,4—1,9	0,5—0,8	6—10
Gießereikoks	88—91	0,25—0,35	0,8—1,6	0,5—0,8	6—10
Torfkoks	88—91	2,0—2,3	6,5—7,2	0,2—0,3	2—3,5
Holzkohle, weich	68—72	4,5—5	22—26	—	1
Holzkohle, hart	80—82	3,5—4	14—16	—	1
Meilerkohle	86—90	2,7—3	7—10	—	1
Braunkohlenschwelkoks	70—76	3—3,5	8—12	0,5—1,5	10—25
Steinkohlenschwelkoks	80—85	2,5—3	5—6	0,5—1,0	6—10
Mitteltemperaturkoks	82—88	1—2	2—3	0,5—1,0	6—10

Der Heizwert von Hochtemperaturkoks beträgt mit großer Annäherung 7950 kcal/kg Reinkoks (asche- und wasserfreie Substanz).

i) Durchschnittliche Zusammensetzung der Asche von Steinkohle.

Bestandteil	%	Bestandteil	%	Bestandteil	%
Al ₂ O ₃	15—30	MgO	1—8	SO ₃	1—2,5
Fe ₂ O ₃	12—22	K ₂ O + Na ₂ O	1—5	P ₂ O ₅	0,2—0,8
CaO	1,5—15	SiO ₂	30—50	Sonstige	0,5—3

k) Schmelzverhalten von Kohlenaschen.

unterhalb 1200°	leichtflüssig
1200 bis 1350°	flüssig
1350 » 1500°	strengflüssig
1500 » 1600°	sehr strengflüssig
1600 » 1700°	nahezu feuerfest
oberhalb 1700°	feuerfest.

Schmelzpunkte von Aschen von Ruhrkohlen. (Nach Schulte, Ztschr. VDI 68, 1021, 1924.)

Gasflammkohle	1145 bis 1360°	Fettkohle	1000 bis 1350°
Gaskohle	1150 » 1350°	Magerkohle	1030 » 1340°

21. Heizwert (Verbrennungswärme).

a) Heizwert der Gase.

1. Begriff.

Der obere Heizwert (Verbrennungswärme) eines Gases stellt die Wärmemenge dar, die bei der vollständigen Verbrennung einer Einheit (kmol, kg oder Nm³) des trockenen Gases gebildet wird, wenn nach der Verbrennung die Verbrennungsprodukte auf die Ausgangstemperatur

zurückgekühlt werden und sich das bei der Verbrennung gebildete Wasser in flüssigem Zustand befindet.

Der untere Heizwert, oft auch nur als Heizwert bezeichnet, ist gegenüber dem oberen Heizwert um die Verdampfungswärme des bei der Verbrennung gebildeten Wassers niedriger. Als Verdampfungswärme ist der bei 0° gültige Wert von 597 kcal/kg einzusetzen. Ein Unterschied zwischen dem oberen und unteren Heizwert besteht somit nur bei Wasserstoff enthaltenden Gasen, bei technischen Gasen beträgt er im allgemeinen 10 bis 15% des oberen Heizwertes.

Die gesetzliche Wärmeeinheit (lt. Reichsgesetz vom 7. 8. 1924) bildet die Kilokalorie, d. h. die Wärmemenge, die zum Erwärmen von 1 kg Wasser bei 760 Torr von 14,5 auf 15,5° erforderlich ist. Das Hundertfache dieser Wärmeeinheit deckt sich genau mit der Wärmemenge, die zum Erwärmen von 1 kg Wasser unter Normbedingungen von 0 auf 100° C benötigt wird. (Die früher gebräuchliche 0°-kcal beträgt das 1,0050fache der 15°-kcal.)

Bei wärmetechnischen Rechnungen ist je nach der Art des Verbrennungsverlaufs der obere oder untere Heizwert einzusetzen. Zumeist befindet sich das Verbrennungswasser in den Verbrennungsabgasen in dampfförmigem Zustand, so daß nur der untere Heizwert ausgenützt wird.

Der obere bzw. untere Heizwert von Gasgemischen setzt sich additiv zusammen aus den Heizwerten der Einzelgase.

Für die Umrechnung der Heizwerte bei konstantem Druck (H_p) auf Heizwerte bei konstantem Volumen (H_v) gilt je Mol die Beziehung

$$H_v - H_p = n \cdot R \cdot T = 1,986 \cdot n \cdot T,$$

worin T die absolute Temperatur und n die Zahl angibt, wieviel Mole nach der Verbrennung mehr vorhanden sind als vor der Verbrennung.

2. Heizwert des Kohlenstoffs und der Gase (DIN 1872).

Stoff	Molekular- gewicht	Mol- volumen bei 0° und 760 Torr Nm ³ /kmol	Heizwerte					
			H_o kcal/kmol	H_u kcal/kmol	H_o kcal/kg	H_u kcal/kg	H_o kcal/Nm ³	H_u kcal/Nm ³
Kokskohlenstoff bei Verbrennung zu CO ₂	C	12,000	97000	97000	8080	8080	—	—
bei Verbrennung zu CO	C	12,000	29300	29300	2440	2440	—	—
Kohlenstoff (β-Graphit) bei Verbrennung zu CO ₂	C	12,000	94300	94300	7860	7860	—	—
bei Verbrennung zu CO	C	12,000	26600	26600	2220	2220	—	—
Kohlenoxyd	CO	28,00	67700	67700	2420	2420	3020	3020

Stoff	Molekular- gewicht	Mol- volumen bei 0° und 760 Torr Nm ³ /kmol	Heizwerte							
			H _o		H _u		H _o		H _u	
			kcal/kmol	kcal/kg	kcal/kmol	kcal/kg	kcal/Nm ³	kcal/Nm ³	kcal/Nm ³	kcal/Nm ³
Wasserstoff	H ₂	2,0156	22,43	68350	57590	33910	28570	3050	2570	
Methan	CH ₄	16,03	22,36	212800	191290	13280	11930	9520	8550	
Azetylen	C ₂ H ₂	26,02	22,22	313000	302240	12030	11620	14090	13600	
Äthylen	C ₂ H ₄	28,03	22,24	340000	318490	12130	11360	15290	14320	
Äthan	C ₂ H ₆	30,05	22,16	372800	340530	12410	11330	16820	15370	
Propylen	C ₃ H ₆	42,05	21,96	495000	462730	11770	11000	22540	21070	
Propan	C ₃ H ₈	44,06	21,82	530600	487580	12040	11070	24320	22350	
Butylen	C ₄ H ₆	56,06	(22,4)	652000	608980	11630	10860	(29110)	(27190)	
Normal-Butan	C ₄ H ₁₀	58,08	21,49	687900	634120	11840	10920	32010	29510	
Iso-Butan	»	»	21,77	686300	632520	11820	10890	31530	29050	
Benzoldampf	C ₆ H ₆	78,05	(22,4)	783000	750730	10030	9620	(34960)	(33520)	
Methylchlorid	CH ₃ Cl	50,48	21,88	170000	153870	3370	3050	7770	7030	
Ammoniak	NH ₃	17,031	22,08	91000	74870	5340	4400	4120	3390	
Schwefelwasserstoff bei Verbrennung zu SO ₂	H ₂ S	34,08	22,14	136000	125240	3990	3680	6140	5660	
bei Verbrennung zu SO ₃	H ₂ S	34,08	22,14	159500	148740	4680	4360	7200	6720	

3. Heizwert verschiedener Kohlenstoffarten (nach Roth, Ztschr. angew. Chem. 41, 277, 1928).

Kohlenstoffart	spez. Gewicht	Heizwert kcal/kg
Diamant	3,514	7873
α — Graphit	2,258 ± 0,002	7832
β — Graphit	2,220 ± 0,002	7856
Glanzkohle	2,07	8051
Glanzkohle	2,00	8071
Glanzkohle	1,86	8148

b) Heizwert verschiedener organischer Stoffe.

Stoff	Heizwert		Stoff	Heizwert	
	H _o kcal/kg	H _u kcal/kg		H _o kcal/kg	H _u kcal/kg
Äther	8850	8150	Motorenbenzol	10500	10100
Äthylalkohol	7140	6440	Methanol	5365	4665
Benzin	10500—11500	9980—10700	Naphthalin	9600	9260
Benzoesäure (Eichsubstanz)	6324	6060	Paraffinöl	10400—11000	9800—10500
Benzol			Pentan	11620	10720
Braunkohlen- teeröl	10025 10000	9615 9400	Petroleum	10000—11000	9500—10400
Erdöl	10000—10500	9500—10000	Phenol	7790	7445
Gasöl	10600—10900	10100—10400	Pyridin	8415	8075
Gelböl	9950—10250	9450—9750	Schwefelkohlen- stoff	3400	—
Glycerin	4315	3845	Solaröl	10600	10000
Heizöl	10100—10400	9600—9900	Spiritus (35%)	6710	5985
Hexan	11550	10670	Steinkohlenteer	8100—8800	7800—8400
Kreosotöl	9000	8600	Steinkohlenteeröl	9300—9600	9000—9300
Masut	10700	10200	Toluol	10170	9700
			Xylol	10230	9720

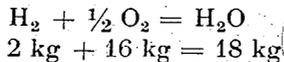
22. Luftbedarf und Verbrennungsprodukte.

Die Grundlagen bei der wärmetechnischen Betrachtung von Verbrennungsvorgängen bilden die Berechnung des Luftbedarfs und des Abgasvolumens sowie der Abgaszusammensetzung. Jedem Brennstoff ist für seine vollständige Verbrennung ein bestimmter Luftbedarf eigen, der sich aus seiner Zusammensetzung mühelos errechnen läßt. Daraus ergibt sich ferner das Abgasvolumen bzw. dessen Zusammensetzung.

Für die Durchführung der Berechnung verwendet man hierbei zweckmäßigerweise ein Schema, in dem der Luft- bzw. Sauerstoffbedarf bei technischen Gasgemischen jeweils für den der Einzelgase, bei festen und flüssigen Brennstoffen für deren elementare Einzelbestandteile berechnet wird. Beispiele unter Zugrundelegung eines Stadtgases und einer Steinkohle sollen dies näher erläutern. Bei Gasen liegt eine Unsicherheit bei den ungesättigten Kohlenwasserstoffen, die aus einem Gemisch von Äthylen, Propylen, Azetylen und den Dämpfen aromatischer Kohlenwasserstoffe bestehen. Bei diesen legt man ähnlich wie bei der Berechnung des Heizwertes und des spezifischen Gewichtes mit genügender Annäherung Propylen zugrunde. Nicht vollgültig ist diese vereinfachende Annahme bei vollständiger Benzol- auswaschung, da in diesem Fall das Mittel des Luftbedarfs etwas niedriger ist als der des Propylens.

Bei festen und flüssigen Brennstoffen errechnet man deren Luftbedarf aus ihrer Elementarzusammensetzung auf folgender Grundlage:

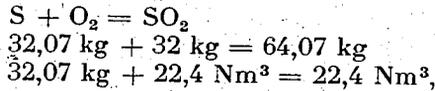
1 Mol Kohlenstoff (C) = 12 kg benötigt zu seiner vollkommenen Verbrennung 1 Mol Sauerstoff (= 22,4 Nm³), wobei das gleiche Volumen Kohlendioxyd (= 22,4 Nm³) gebildet wird¹⁾. 1 kg Kohlenstoff benötigt somit 1,867 Nm³ Sauerstoff und bildet 1,867 Nm³ Kohlendioxyd. Bei dem im Brennstoff enthaltenen Sauerstoff nimmt man an, daß dieser mit dem Wasserstoffgehalt Wasser bildet. Dies ist stets möglich, da der Wasserstoffgehalt selbst einer jungen, sehr sauerstoffreichen Braunkohle hierfür ausreichend ist. Da nach der Gleichung



auf je 1 kg Wasserstoff 8 kg Sauerstoff entfallen, wird von dem Gesamtwasserstoff zunächst der zur Wasserbildung aus dem Sauerstoffgehalt des Brennstoffs benötigte Anteil (O/8) abgezogen. Der restliche sog. »disponible« Wasserstoff (H — O/8) erfordert daraufhin zu seiner Verbrennung Luftsauerstoff, und zwar gemäß der obigen Formel je Gewichtsteil Wasserstoff (kg) $\frac{1}{4}$ Mol = 5,6 Nm³ Sauerstoff, wobei $\frac{1}{2}$ Mol = 11,2 Nm³ Wasserdampf entstehen.

¹⁾ Entgegen der früheren Annahme beträgt das Molvolumen der Gase nicht genau 22,412 Nm³, sondern dies trifft mit großer Annäherung nur bei den Gasen zu, deren kritische Temperatur unterhalb Raumtemperatur liegt, bei den anderen ist es zum Teil erheblich niedriger (vgl. Zahlentafel auf S. 3).

Der verbrennliche Schwefel des Brennstoffes erfordert nach der Gleichung



d. h. je Gewichtsteil 0,698 Nm³ Sauerstoff, während die gleichen Raumeile Schwefeldioxyd gebildet werden. Infolge seines sauren Charakters wird für die Abgasanalyse im allgemeinen der Gehalt an Schwefeldioxyd dem des an Kohlendioxyd zugezählt, da beide Gase bei der Gasanalyse ebenfalls zusammen erfaßt werden.

Der Stickstoffgehalt des Brennstoffs wird bei der Verbrennung gasförmig abgespalten, und zwar bilden sich nach der Avogadroschen Lehre je kg Stickstoff 0,80 Nm³, die mit in die Verbrennungsprodukte übergehen.

Beispiele:

a) Berechnung des Luftbedarfs und Abgasvolumens bei Verbrennung von Stadtgas.

Zusammensetzung des Gases	Sauerstoffbedarf je Nm ³	Es werden gebildet		
		Nm ³ CO ₂	Nm ³ H ₂ O	Nm ³ N ₂
CO ₂ 4,0%	—	0,040	—	—
sKW 2,0%	0,0900	0,060	0,060	3,009
CO 21,5%	0,1075	0,215	—	(dem Sauerstoff ent- sprechender Luftstickstoff)
H ₂ 51,5%	0,2575	—	0,515	
CH ₄ 17,0%	0,3400	0,170	0,340	
N ₂ 4,0%	—	—	—	0,04
100,0%	0,7950	0,485	0,915	3,049

Luftbedarf: 0,795 Nm³ O₂
3,009 » N₂

3,804 Nm³ Luft/Nm³ Gas

Abgasvolumen: 0,485 Nm³ CO₂
0,915 » H₂O (Dampf)
3,049 » N₂

4,449 Nm³ Abgasvolumen

Abgaszusammensetzung: 10,9% CO₂
(feucht) 20,6% H₂O (Dampf)
68,5% N₂

100,0%

desgl. trocken: 13,7% CO₂
86,3% N₂

100,0%

Taupunkt der Abgase.

Für die Berechnung des Taupunktes der Abgase wird deren Gehalt an Wasserdampf von % auf den Partialdruck (Torr) umgerechnet und daraufhin in Zahlentafel auf S. 48 aus diesem Sättigungsdruck die zugehörige Taupunktstemperatur abgelesen.

Im vorigen Beispiel entsprach der Teildruck des Wasserdampfes im feuchten Abgas 20,6% bzw.

$$\frac{20,6}{100} = \frac{x}{760} \quad x = 156,6,$$

einem Teildruck von 156,6 Torr. Die zugehörige Sättigungs-(Taupunkt-)Temperatur des Abgases ergibt sich somit zu 61° C.

Die im vorhergehenden zugrunde gelegten Rechnungen gelten für theoretisch vollkommene Verbrennung. Bei Anwendung von Luftüberschuß wird im Abgas Sauerstoff gefunden.

Die Luftüberschußzahl U bedeutet

$$U = \frac{\text{Zur Verbrennung angewendetes Luftvolumen}}{\text{Theoretisch erforderliches Luftvolumen}}$$

bzw., da der Stickstoffgehalt der Luft 79,1% beträgt,

$$U = \frac{\text{Im angewandten Luftvolumen enthaltener Stickstoff}}{\text{Im theoretischen Luftbedarf enthaltener Stickstoff}}$$

Für die Berechnung der Luftüberschußzahl U berechnet man das dem im Abgas enthaltenen Sauerstoff o_1 zugehörige Stickstoffvolumen n_1 . Der Unterschied von Gesamtstickstoff n abzüglich n_1 ergibt das bei theoretisch erforderlicher Luftmenge als Luft zugeführte Stickstoffvolumen n_2 ($n_2 = n - n_1$).

Unter Annahme der folgenden Abgaszusammensetzung: CO_2 8,5%, O_2 6,8%, N_2 84,7% beträgt je 100 Vol. Abgas das dem überschüssigen Sauerstoff o_1 entsprechende Stickstoffvolumen $n_1 = 6,8 \cdot \frac{79,1}{20,9} = 25,7$ Vol.

Nach Abzug von n_1 vom Gesamtstickstoff $n = 84,7$ Vol. verbleibt das der theoretisch erforderlichen Luftmenge zugehörige entsprechende Stickstoffvolumen $n_2 = n - n_1 = 59,0$ Vol. Daraus errechnet sich das theoretisch erforderliche Luftvolumen zu $59 \cdot \frac{100}{79,1} = 74,6$ Vol. Die Luftüberschußzahl U errechnet sich daraus zu

$$U = \frac{74,6 + 6,8 + 25,7}{74,6} = \frac{107,1}{74,6} = 1,44.$$

Bei dieser Art der Rechnungsdurchführung wird der Eigenstickstoffgehalt des Brennstoffs vernachlässigt. Diese Annäherungsrechnung gilt daher nur bei stickstoffarmen Brenngasen und festen Brennstoffen, nicht dagegen bei Luftgasen und ähnlich zusammengesetzten. Wenn

infolge eines höheren Stickstoffgehaltes des Brennstoffs diese Annäherungsrechnung nicht durchführbar ist, muß von dem Gesamtstickstoff des Abgases zunächst der dem Kohlenstoffgehalt desselben entsprechende Stickstoff (gemäß der Brennstoffzusammensetzung) in Abzug gebracht werden. Daraufhin kann die oben angegebene Rechnungsdurchführung in gleicher Weise vorgenommen werden.

Neben der Kenntnis der Luftüberschußzahl ist zuweilen noch die Verdünnungszahl V von Interesse.

$$V = \frac{\text{Vorhandenes Rauchgasvolumen}}{\text{Bei theoretischer Verbrennung entwickeltes Rauchgasvolumen}}$$

Die Zahlenwerte für Luftüberschußzahl und Verdünnungszahl sind im allgemeinen nahezu gleich.

b) Berechnung des Luftbedarfs und Abgasvolumens bei Verbrennung von Steinkohle.

Zusammensetzung des Brennstoffs	Sauerstoffbedarf Nm ³ /100 kg Brennstoff	Es werden gebildet		
		Nm ³ CO ₂	Nm ³ H ₂ O	Nm ³ N ₂
C . . . 85,0%	$\frac{85,0}{0,537} = 158,3$	158,3	—	676,7
H . . . 4,6% ¹⁾	$3,55 \frac{22,4}{4} = 19,9$	—	$4,6 \frac{22,4}{2} = 51,5$	
O . . . 8,4%	—	—	—	
verbr. S. 0,8%	—	0,56	—	
N . . . 1,2%	—	—	—	
100,0%	178,8	158,9	51,5	677,7

¹⁾ Disponibler Wasserstoff: $4,6 - \frac{8,4}{8} = 3,55\%$.

Luftbedarf: $178,8 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2$
 $676,7 \text{ » N}_2$

 $855,5 \text{ Nm}^3 \text{ Luft/100 kg Brennstoff}$

Abgasvolumen: $158,9 \text{ Nm}^3 \text{ CO}_2$
 $51,5 \text{ » H}_2\text{O (Dampf)}$
 $677,7 \text{ » N}_2$

 $888,1 \text{ Nm}^3 \text{ Abgasvolumen}$

Abgaszusammensetzung: $17,9\% \text{ CO}_2$
(feucht) $5,8\% \text{ H}_2\text{O (Dampf)}$
 $76,3\% \text{ N}_2$

 $100,0\%$

desgl. trocken: $19,0\% \text{ CO}_2$
 $81,0\% \text{ N}_2$

 $100,0\%$

Kohlendioxydgehalt und mittlere trockene Rauchgasmenge bei der Verbrennung
von festen Brennstoffen in Abhängigkeit von der Luftüberschußzahl)
(Bezogen auf Reinkohle.)

	Luftüberschußzahl																
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	
Koks, . . .	CO ₂ %	20,7	18,8	17,2	15,9	14,8	13,8	12,9	12,2	11,5	10,9	10,4	9,4	8,6	8,0	7,4	6,9
	{ V Nm ³ /kg	8,73	9,61	10,48	11,36	12,23	13,11	13,98	14,85	15,73	16,60	17,48	19,23	20,98	22,72	24,47	26,22
Gasflammenkohle	CO ₂ %	18,5	16,8	15,4	14,2	13,2	12,3	11,5	10,8	10,2	9,7	9,2	8,4	7,7	7,1	6,6	6,1
	{ V Nm ³ /kg	8,39	9,26	10,12	10,98	11,80	12,71	13,57	14,44	15,30	16,17	17,03	18,76	20,49	22,21	23,94	25,67
Kokskohle	CO ₂ %	18,6	16,9	15,5	14,3	13,3	12,4	11,7	11,0	10,4	9,8	9,3	8,5	7,8	7,2	6,7	6,2
	{ V Nm ³ /kg	8,71	9,61	10,50	11,40	12,29	13,19	14,08	14,97	15,87	16,76	17,66	19,45	21,24	23,03	24,82	26,61
Eßkohle	CO ₂ %	18,8	17,1	15,7	14,5	13,4	12,5	11,7	11,0	10,4	9,9	9,4	8,6	7,9	7,3	6,7	6,3
	{ V Nm ³ /kg	8,84	9,74	10,60	11,56	12,46	13,37	14,27	15,18	16,09	16,99	17,90	19,71	21,52	23,34	25,15	26,96
Anthrazit.	CO ₂ %	19,1	17,4	15,9	14,7	13,6	12,7	11,9	11,2	10,6	10,0	9,6	8,7	8,0	7,4	6,8	6,4
	{ V Nm ³ /kg	8,89	9,80	10,70	11,61	12,52	13,42	14,33	15,23	16,14	17,01	17,96	19,77	21,58	23,40	25,21	27,02

Die Umrechnung von Reinkohle und trockenem Abgas auf Rohkohle und feuchtes Abgas erfolgt nach der Beziehung

$$V_{\text{Rohkohle}} = V \frac{100 - (A + W)}{100} + \frac{9 \cdot H + W}{100} \cdot 1,244.$$

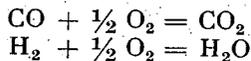
Darin bedeuten *A*, *W* und *H* den Asche-, Wasser- und Wasserstoffgehalt der Rohkohle.

¹⁾ Rohrkohlehandbuch 1932, S. 92.

23. Chemismus der Verbrennungsvorgänge in Flammen.

Der Chemismus der Verbrennung von Gasen wurde früher derart gedeutet, daß Kohlenwasserstoffe zunächst durch teilweise Oxydation in Kohlenoxyd und Wasserstoff übergeführt werden und diese dann die Verbrennungsendprodukte Kohlendioxyd und Wasser bilden.

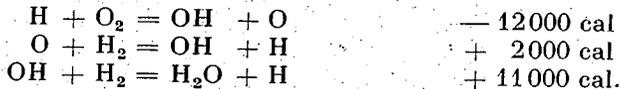
Man unterschied daher zwischen verbrennungsreifen Gasen (Wasserstoff und Kohlenoxyd) und noch nicht verbrennungsreifen Gasen. Bei den ersteren nahm man an, daß deren Verbrennung glatt nach den Gleichungen



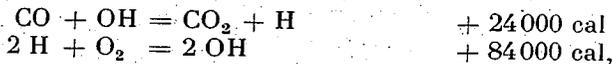
vonstatten geht.

Es hat sich jedoch gezeigt, daß die Flammenstrahlung keine reine Temperaturstrahlung ist, sondern wahrscheinlich zum Teil auf Chemilumineszenz zurückzuführen ist. Die spektroskopische Untersuchung der Bunsenflammen für das sichtbare und ultraviolette Gebiet hat ergeben, daß die hauptsächlichsten Lichtträger das Radikal OH und bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen die Radikale CH und C₂ darstellen. Es konnte auf physikalisch-chemischem Wege ferner nachgewiesen werden, daß sämtliche Verbrennungsreaktionen über Ketten verlaufen. Die reaktionskinetische Grundlage derselben bildet die kinetische Gastheorie, die die Zahl der Zusammenstöße zwischen den Molekülen der Reaktionsteilnehmer zu erfassen gestattet. Da aber nur ein kleiner Bruchteil dieser Zusammenstöße tatsächlich zu einer Umsetzung führt, ergibt es sich, daß für diese die Überschreitung eines kritischen Energiewertes durch einen Bruchteil der reagierenden Moleküle notwendig ist. Die Zahl dieser aktivierten Moleküle kann aus dem Temperaturkoeffizienten der Reaktionsgeschwindigkeit berechnet werden.

Für die Verbrennung des Wasserstoffes ergibt sich folgender Verbrennungsmechanismus (Wärmetönungen in cal/g Mol):

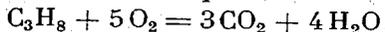


Die Verbrennung des Kohlenoxyds verläuft nur in Gegenwart von Wasserdampf oder von zu diesem verbrennendem Wasserstoff, der OH- und H-Radikale gebildet hat, gemäß der Formel:



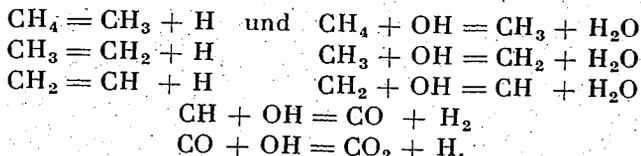
wobei die Bildung neuer OH-Radikale gemäß der letzten Gleichung erfolgt.

Wesentlich verwickelter ist der Abbau der Kohlenwasserstoffe. Schon aus der Summengleichung für die Verbrennung eines Kohlenwasserstoffes, beispielsweise des Propans



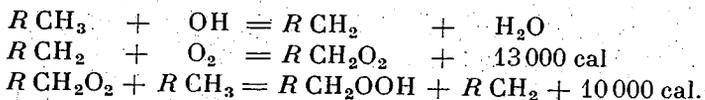
ist ersichtlich, daß gemäß der kinetischen Gastheorie eine derartige Reaktion unter Beteiligung von 6 Molekülen nicht auf einmal von-statten gehen kann, sondern daß sie stufenweise abläuft.

Es tritt vielmehr zunächst ein dehydrierender Abbau der Kohlen-wasserstoffe ein, der bei Methan infolge des spektroskopisch festge-stellten Nachweises des CH-Radikals wahrscheinlich folgende Reak-tionsstufen aufweist:



Daneben können als Zwischenkörper unter geeigneten Bedingungen ferner Aldehyde wie Formaldehyd und andere Sauerstoffverbindungen, entstehen.

Für höhermolekulare Kohlenwasserstoffe wird ein Reaktionsablauf folgender Art angenommen:



Diese Vielzahl von neben- und nacheinander verlaufenden Reak-tionsmöglichkeiten erschwert in starkem Maße ein tieferes Eindringen in dieses Gebiet.

Messungen über die Brennbedingungen unentleuchteter Flammen hinsichtlich Flammengröße und Flammenvolumen haben Bunte und Lang¹⁾ veröffentlicht. Ergebnisse, die ein tieferes Eindringen in dieses Gebiet erlauben, konnten dabei jedoch bisher nicht ermittelt werden.

4. Grenztemperaturen von Brenngasen ohne und mit Berücksichtigung von Dissoziationserscheinungen.

Grenztemperaturen ohne Berücksichtigung der Dissoziation der Verbrennungsprodukte.

Bei zahlreichen wärmetechnischen Vorgängen ist neben einer be-stimmten Wärmeleistung eine gewisse Temperaturhöhe erforderlich, die bei Gasfeuerungen durch die Flammentemperatur gegeben ist. Die theoretische Verbrennungs- oder Flammentemperatur (Grenztempe-ratur t_g in °C) ist diejenige Temperatur, die ein Gas bei seiner Verbren-nung erreicht, wenn diese ohne jede Wärmeabgabe adiabatisch erfolgt. Bei dieser adiabatischen Verbrennung wird die gesamte freiwerdende Wärme, die dem unteren Heizwert H_u des Brenngases entspricht, von

¹⁾ GWF 74, 1073 (1931).

den Verbrennungsprodukten aufgenommen, d. h. sie ist gleich dem fühlbaren Wärmeinhalt der Verbrennungsabgase.

Es gilt somit die Gleichung:

$$H_u = t_g \cdot V \cdot c_{pm} \dots \dots \dots (1)$$

H_u = unterer Heizwert des Brenngases (kcal/Nm³),

t_g = Grenztemperatur (°C),

V = Abgasvolumen je Nm³ Brenngas (Nm³),

c_{pm} = mittlere spezifische Wärme der Abgase bei der Grenztemperatur (kcal/Nm³ °C).

Die Wärmekapazität der Abgase (Abgasvolumen $V \cdot$ mittlerer spezifischer Wärme der Abgase c_{pm}) untergliedert sich infolge der Verschiedenheit der spezifischen Wärmen der Einzelgase gemäß

$$V \cdot c_{pm} = V_{CO_2} \cdot c_{pmCO_2} + V_{H_2O} \cdot c_{pmH_2O} + V_{N_2} \cdot c_{pmN_2} \dots \dots (2)$$

Bei Vorwärmung des Gases bzw. der Luft oder beider Anteile wird die zugeführte Wärme (H_u) ferner vermehrt um deren fühlbaren Wärmeinhalt Q , so daß die Gleichung (1) in allgemeiner Form wie folgt lautet:

$$H_u + Q = t_g (V_{CO_2} \cdot c_{pmCO_2} + V_{H_2O} \cdot c_{pmH_2O} + V_{N_2} \cdot c_{pmN_2})$$

bzw. nach t_g aufgelöst:

$$t_g = \frac{H_u + Q}{V_{CO_2} \cdot c_{pmCO_2} + V_{H_2O} \cdot c_{pmH_2O} + V_{N_2} \cdot c_{pmN_2}} \dots \dots (3)$$

wobei

$$Q = t_{Gas} \cdot c_{pmGas} + t_{Luft} \cdot c_{pmLuft} \text{ ist.}$$

Da die mittleren spezifischen Wärmen in ihrer Größe temperaturabhängig sind, kann bei Anwendung der Formel 3 die Berechnung der Grenztemperatur nur durch Probieren erfolgen, wenn nicht die mittleren spezifischen Wärmen als Formeln eingesetzt werden (vgl. S. 65).

Durch Einsetzen der entsprechenden Formeln in die obige Gleichung (3) läßt sich diese für die Temperaturbereiche von 1200 bis 2000° bzw. von 1800 bis 2800° wie folgt umformen:

$$H_u + Q = t_g \cdot \left(V_{CO_2} \left(0,639 - \frac{120}{t_g} \right) + V_{H_2O} \left(0,519 - \frac{120}{t_g} \right) + V_{N_2} \left(0,373 - \frac{40}{t_g} \right) \right) \quad (4a)$$

$$H_u + Q = 0,639 \cdot V_{CO_2} \cdot t_g - 120 V_{CO_2} + 0,519 V_{H_2O} \cdot t_g - 120 V_{H_2O} + 0,373 V_{N_2} \cdot t_g - 40 V_{N_2} \quad (4b)$$

$$H_u + Q + 120 V_{CO_2} + 120 V_{H_2O} + 40 V_{N_2} = t_g (0,639 \cdot V_{CO_2} + 0,519 \cdot V_{H_2O} + 0,373 \cdot V_{N_2}) \quad (4c)$$

und daraus ergibt sich die Grenztemperatur für den Temperaturbereich 1200 bis 2000° zu

$$t_g \underset{(1200-2000^\circ)}{=} \frac{H_u + Q + 120 \cdot V_{\text{CO}_2} + 120 \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + 40 \cdot V_{\text{N}_2}}{0,639 \cdot V_{\text{CO}_2} + 0,519 \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + 0,373 \cdot V_{\text{N}_2}} \quad (5)$$

und entsprechend für den Temperaturbereich 1800 bis 3000°

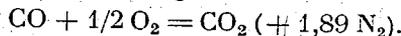
$$t_g \underset{(1800-3000^\circ)}{=} \frac{H_u + Q + 140 \cdot V_{\text{CO}_2} + 200 \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + 70 \cdot V_{\text{N}_2}}{0,649 \cdot V_{\text{CO}_2} + 0,561 \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + 0,389 \cdot V_{\text{N}_2}} \quad (6)$$

Diese beiden Näherungsformeln zur Bestimmung der absoluten Grenztemperatur bedeuten gegenüber den Schackschen Formeln¹⁾ eine Vereinfachung, da durch eine günstigere Auswertung der mittleren spezifischen Wärmen für den gesamten in Betracht kommenden Temperaturbereich von 1200 bis 3000° zwei Formeln genügen und die Zahlenwerte einfacher sind.

Beispiele:

Berechnung der Grenztemperatur von CO.

Aus Formel (6) fallen naturgemäß die Zahlenwerte für H₂O weg.

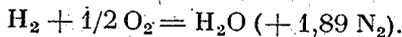


$$t_g \underset{(1800-3000^\circ)}{=} \frac{3020 + 140 \cdot 1 + 70 \cdot 1,89}{0,649 \cdot 1 + 0,389 \cdot 1,89} = \frac{3020 + 140 + 132,3}{0,649 + 0,738} \\ = \frac{3292,3}{1,387} = 2380^\circ.$$

(Durch Probieren rechnerisch nach Formel 3 ermittelt 2390°.)

Berechnung der Grenztemperatur von H₂.

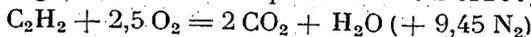
Jetzt fallen aus Formel (6) die Zahlenwerte für CO₂ weg.



$$t_g \underset{(1800-3000^\circ)}{=} \frac{2570 + 200 + 70 \cdot 1,89}{0,561 + 0,389 \cdot 1,89} = \frac{2902,3}{1,299} = 2230^\circ.$$

(Durch Probieren rechnerisch nach Formel 3 ermittelt 2230°.)

Berechnung der Grenztemperatur von Azetylen C₂H₂.



$$H_{u \text{C}_2\text{H}_2} = 13600 \text{ kcal/Nm}^3.$$

nach Näherungsformel (6):

$$t_g \underset{(1800-3000^\circ)}{=} \frac{13600 + 140 \cdot 2 + 200 \cdot 1 + 70 \cdot 9,45}{0,649 \cdot 2 + 0,561 \cdot 1 + 0,389 \cdot 9,45} \\ = \frac{13600 + 280 + 200 + 661,5}{1,298 + 0,561 + 3,680} = \frac{14741,5}{5,539} = 2660^\circ.$$

Grenztemperatur theor. nach (3) durch Probieren ergibt ebenfalls genau 2660°.

¹⁾ Mitt. d. Wärmestelle des VDE Nr. 76 (1925).

Berechnung der Grenztemperatur eines Steinkohlengases.

Zusammensetzung %	Sauerstoff- bedarf je Nm ³ Gas	gebild. CO ₂ je Nm ³ Gas	gebildeter Wasser- dampf je Nm ³ Gas	zugehöriger Luftstick- stoff Nm ³
CO ₂ 2,0	—	0,020	—	
sKW 3,5	0,1575	0,105	0,105	
CO 8,5	0,0425	0,085	—	
H ₂ 52,5	0,2625	—	0,525	0,430
CH ₄ 30,0	0,6000	0,300	0,600	
N ₂ 3,5	—	—	—	0,035
100,0	1,0625	0,510	1,230	4,065

Abgasvolumen je Nm³ Gas: 0,510 Nm³ CO₂
 1,230 „ H₂O H_u = 4900 kcal/Nm³
 4,065 „ N₂
 —————
 5,805 Nm³

Grenztemperatur:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,510, \quad V_{\text{H}_2\text{O}} = 1,230, \quad V_{\text{N}_2} = 4,063$$

$$H_u = 4900, \quad Q = 0.$$

$$t_g = \frac{4900 + 140 \cdot 0,510 + 200 \cdot 1,230 + 70 \cdot 4,065}{0,649 \cdot 0,510 + 0,561 \cdot 1,230 + 0,389 \cdot 4,065}$$

$$t_g = \frac{5502,4}{2,601} = 2115.$$

Grenztemperatur: 2115° C.

Berechnung der Grenztemperatur unter Berücksichtigung der Dissoziation der Verbrennungsprodukte.

Für die Ermittlung der Grenztemperatur von Gasen unter Berücksichtigung der Dissoziation der Verbrennungsprodukte muß das rechnerische Schätzverfahren angewendet werden.

Beispiele: Berechnung der Grenztemperatur von CO unter Berücksichtigung der Dissoziation.

Bei CO-Verbrennung: CO₂-Gehalt 34,6% entspricht also einem Partialdruck von 0,346 at.

α bei ~ 0,35 at und 2100° = 0,125 (vgl. S. 87)

$$t_g = \frac{H_{u\text{CO}}(1 - \alpha)}{(1 - \alpha) c_{p\text{mCO}_2} + \alpha c_{p\text{mCO}} + \frac{\alpha}{2} c_{p\text{mO}_2} + 1,89 c_{p\text{mN}_2}}$$

$$t_g = \frac{3020(1 - 0,125)}{(1 - 0,125) 0,582 + 0,125 \cdot 0,358 + \frac{0,125}{2} \cdot 0,369 + 1,89 \cdot 0,35}$$

$$\stackrel{(2100^\circ)}{=} \frac{2645}{1,2478} = 2120^\circ.$$

Geschätzt wurde 2100°, die Rechnung ergab 2120. Die wahre Temperatur liegt also zwischen der angenommenen und errechneten Temperatur, etwa bei 2110°.

Analog erfolgt die Berechnung der Grenztemperatur vom H₂ unter Berücksichtigung der Dissoziation.

H₂O-Gehalt 34,6%, Partialdruck ~ 0,35 at.

$$t_g = \frac{H_{uH_2} (1 - \alpha)}{(1 - \alpha) c_{p_{mH_2O}} + \alpha c_{p_{mH_2}} + \frac{\alpha}{2} c_{p_{mO_2}} + 1,89 \cdot c_{p_{mN_2}}}$$

Berechnung der Grenztemperatur von Azetylen C₂H₂ unter Berücksichtigung der Dissoziation.

Bei Verbrennung von C₂H₂ entstehen:

$$\begin{array}{l} 2 \text{ CO}_2 \quad = \sim 16\% \\ 1 \text{ H}_2\text{O} \quad = \sim 8\% \\ \hline 9,45 \text{ N}_2 \quad = \sim 76\% \end{array}$$

Abgasvolumen 12,45 Nm³ = 100%.

Bei einer angenommenen Temperatur von 2300° entspricht für CO₂ bei einem Partialdruck von 0,16 at $\alpha_1 = 0,318$.

CO₂: Partialdruck 0,16 at $\alpha_1 = 0,318 \sim 0,32$

H₂O: » 0,08 » $\alpha_2 = 0,1375 \sim 0,14$.

$$t_g^{(2300^\circ)} = \frac{H_{uC_2H_2} - (2\alpha_1 \cdot H_{uCO} + \alpha_2 \cdot H_{uH_2})}{2 \left[(1 - \alpha_1) c_{p_{mCO_2}} + \alpha_1 \cdot c_{p_{mCO}} + \frac{\alpha_1}{2} c_{p_{mO_2}} \right] + (1 - \alpha_2) c_{p_{mH_2O}} + \frac{H_{uC_2H_2} - (2\alpha_1 \cdot H_{uCO} + \alpha_2 \cdot H_{uH_2})}{\alpha_2 c_{p_{mH_2}} + \frac{\alpha_2}{2} c_{p_{mO_2}} + 9,45 c_{p_{mN_2}}}}$$

$$t_g^{(2300^\circ)} = \frac{13600 - (2 \cdot 0,32 \cdot 3020 + 0,14 \cdot 2570)}{2 \left[(1 - 0,32) \cdot 0,588 + 0,32 \cdot 0,361 + \frac{0,32}{2} \cdot 0,371 \right] + (1 - 0,14) \cdot 0,474 + \frac{13600 - (2 \cdot 0,32 \cdot 3020 + 0,14 \cdot 2570)}{0,14 \cdot 0,335 + \frac{0,14}{2} \cdot 0,371 + 9,45 \cdot 0,358}} = \frac{11308}{5,0109} = 2270^\circ.$$

Die wahre Grenztemperatur liegt zwischen 2270° und 2300°, es wird also die Rechnung nochmals für 2280° durchgeführt.

2280° CO₂: Partialdruck 0,16 at $\alpha_1 \sim 0,30$

H₂O: » 0,08 » $\alpha_2 \sim 0,13$

$$t_g^{(2280^\circ)} = \frac{13600 - (2 \cdot 0,303 \cdot 3020 + 0,13 \cdot 2570)}{2 \cdot 0,697 \cdot 0,587 + 0,303 \cdot 0,3605 + 0,515 \cdot 0,371 + 0,87 \cdot 0,473 + \frac{13600 - (2 \cdot 0,303 \cdot 3020 + 0,13 \cdot 2570)}{0,13 \cdot 0,335 + 0,065 \cdot 0,771 + 9,45 \cdot 0,3575}} = \frac{11436}{5,0535} = 2290^\circ.$$

Die wahre Grenztemperatur liegt jetzt zwischen 2290° und 2280°. Also

$$t_{g, C_2H_2} = 2285^\circ.$$

Grenztemperatur eines Steinkohlengases mit Dissoziation.
Nach vorstehender Analyse ergibt sich ein Abgasvolumen

CO ₂ = 0,510 Nm ³	8,8%
H ₂ O = 1,230 »	21,2%
N ₂ = 4,065 »	70,0%
5,805 Nm ³	100,0%

$$H_u = 4900 \text{ kcal/Nm}^3.$$

Das Gas sei auf 500° vorgewärmt, die Verbrennungsluft werde mit 1000° eingeblasen.

(Mittl. spez. Wärmen $c_{p,m}$ technischer Gase siehe S. 69.)

Bei 2100°: CO₂: Partialdruck 0,09 at $\alpha_1 = 0,189$
H₂O: » 0,21 » $\alpha_2 = 0,05$

$$\begin{aligned}
 t_{g(2100^\circ)} &= \frac{4900 - [0,189 \cdot 0,51 \cdot 3020 + 0,05 \cdot 1,23 \cdot 2570] +}{0,51 [(1 - 0,189) \cdot 0,582 + 0,189 \cdot 0,358 + 0,0945 \cdot 0,369] +} \\
 &\quad + 500 \cdot 0,398 + 1000 \cdot 0,336 \\
 &\quad + 1,23 [(1 - 0,05) \cdot 0,466 + 0,05 \cdot 0,333 + 0,025 \cdot 0,369] + 4,065 \cdot 0,355 \\
 &= \frac{4985}{2,3166} = 2150^\circ.
 \end{aligned}$$

Die wahre Grenztemperatur liegt also zwischen 2100° und 2150°, also:

$$t_g = 2125^\circ.$$

25. Zündtemperaturen (Zündpunkte) brennbarer Gase und Dämpfe.

a) Begriff.

Die Zündtemperatur eines brennbaren Gases oder Dampfes stellt die unterste Temperatur dar, bei der sich das Gas in Mischung mit Luft oder einer sonstigen Atmosphäre entzündet, d. h. daß die Reaktionsgeschwindigkeit der Oxydation so groß wird, daß die dabei entwickelte Reaktionswärme eine etwaige Wärmeabgabe übersteigt und die Verbrennung ohne Wärmezuführung von außen weiter fortschreitet.

Die Höhe der Zündtemperatur wird zunächst bestimmt von der Art des Brenngases, der Brenngaskonzentration im Gemisch mit der Sauerstoff enthaltenden Atmosphäre und dem Druck, ferner ist sie abhängig von apparativen Bedingungen, wie der Wärmekapazität des umgebenden Mediums und katalytischen Wandeinflüssen. Ferner kann vor der eigentlichen Zündung eine stille Vorverbrennung eintreten, die infolge der dabei frei werdenden Reaktionswärme und der Bildung von Verbrennungszwischenprodukten mit niedrigerer Zündtemperatur gegebenenfalls bereits die Zündung auszulösen vermag. Werte über die

Zündtemperaturen von Gasen und Dämpfen in Mischung mit Luft und mit Sauerstoff sind nachstehend zusammengestellt.

b) Niedrigste Zündtemperaturen reiner Gase in Mischung mit Luft und Sauerstoff bei 1 at.

Gas	Niedrigste Zündtemperatur mit		Gas	Niedrigste Zündtemperatur mit	
	Luft °C	O ₂ °C		Luft °C	O ₂ °C
Wasserstoff	510	450	Propylen	455	(420)
Kohlenoxyd	610	590	Butylen	445	(400)
Methan	645	645	Azetylen	335	350
Äthan	530	(500)	Cyan	850	800
Propan	510	490	Schwefelwasserstoff	290	220
Butan	490	(460)	Leuchtgas	560	(450)
Äthylen	540	485	Chlorknallgas		240

Die eingeklammerten Werte sind geschätzt.

c) Zündtemperaturen fester Brennstoffe (bei Luftüberschuß).

Stoff	Zündtemperatur °C	Stoff	Zündtemperatur °C
Braunkohle (Staub) ¹⁾	150—170	Steinkohlenschwelkoks	300—400
Steinkohle (Staub) ¹⁾	150—220	Gaskoks	450—600
Holzkohle, weich	250—300	Zechenkoks	550—650
Holzkohle, hart	300—450	Hüttenkoks	600—750
Braunkohlenschwelkoks	300—400	Pechkoks	500—600
Zuckerkohle	300—350	Graphit	700—850

¹⁾ Mit Sauerstoff gemessen.

d) Niedrigste Zündtemperaturen von Dämpfen in Mischung mit Luft bei 1 at.

Stoff	Zündtemperatur °C	Stoff	Zündtemperatur °C
Pentan	550	Zyklohexan	550
Hexan	540	Naphthalin	700
Heptan	520	Tetralin	520
Methanol	500	Phenol	700
Äthylalkohol	450	Benzaldehyd	180
Glyzerin	520	Benzoessäureäthylester	670
Diäthyläther	180	Nitrobenzol	520
Azetaldehyd	400	Anilin	700
Azeton	500	Pyridin	680
Dioxan	450	Benzin	480—550
Methylformiat	500	Gasöl	330—350
Äthylnitrat	200	Paraffin	400
Schwefelkohlenstoff	100	Schmieröl	380—420
Benzol	700	Erdöl, roh	400—450
Toluol	620	Steinkohlenteeröl	600—700
Nylol	580		

26. Flammpunkt und Brennpunkt von Flüssigkeiten.

a) Begriff.

Der Flammpunkt einer Flüssigkeit stellt im Gegensatz zur Zündtemperatur die niedrigste Temperatur dar, bei der sie so viel Dämpfe entwickelt, daß diese mit einer unmittelbar über der Flüssigkeitsoberfläche befindlichen Luftschicht ein entzündliches Gemisch bei Annäherung eines Zündmittels (Flamme, Glühdraht, Funkenstrecke) bilden. Der Gehalt der Luft oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche an brennbaren Dämpfen muß somit die untere Zündgrenze erreichen.

Der Flammpunkt stellt die Temperatur dar, bei der erstmalig eine Zündung des Brenndampf-Luft-Gemisches stattfindet, worauf die Flamme wieder erlischt; der Brennpunkt die Temperatur, bei der die Flamme nach Entfernung des Zündmittels nicht mehr erlischt.

Der Flamm- und Brennpunkt ist von apparativen Einflüssen, wie der Bauart des Flammpunkprüfers, der Art der Zündung, der Erhitzungsgeschwindigkeit und anderen abhängig.

Die gemessenen Werte stellen somit keine physikalischen Kenngrößen, sondern Relativzahlen dar, die jedoch für die Beurteilung der Feuergefährlichkeit eines Stoffes wichtig sind.

Nach der Preußischen Polizeiverordnung 1925 (Ministerialblatt der Handels- und Gewerbeverwaltung 1925, S. 233) sind die organischen Stoffe in bezug auf deren Feuergefährlichkeit in folgende drei Gefahrenklassen hinsichtlich Transport und Lagerung unterzuteilen:

Klasse 1; Öle mit einem Flammpunkt unter 21°,
 » II; » » » von 21 bis 55°,
 » III; » » » » 55 » 100°.

Einzelheiten über die Bestimmung des Flamm- und Brennpunktes siehe Band V, »Analytische Untersuchungsmethoden«.

b) Flammpunkt verschiedener Stoffe.

Stoff	Flammpunkt °C	Stoff	Flammpunkt °C
Steinkohlenteerprodukte.		Braunkohlenteerprodukte.	
Reinbenzol	-16°	Benzin	-60 — -10°
90er Benzol	-15°	Schwerbenzin	0 — +20°
50er Benzol	-10°	Mittelöl	20—50°
ger. Toluol	5°	Solaröl	25—40°
ger. Xylol	20°	Putzöl	60—70°
Solventnaphtha I	20°	Gasöl	70—100°
Solventnaphtha II	30°	Paraffinöl	105—125°
Handelsschwerbenzol	45°	Kreosotöl	80—100°
Naphthalin	80°	Braunkohlenteerheizöl	65—145°
Phenol	80—90°		
Steinkohlenteerheizöl	65—145°		

Stoff	Flammpunkt °C	Stoff	Flammpunkt °C
Erdöldestillations- produkte.		Schmieröle¹⁾.	
Benzin Siedepunkt 50—60°	—58°	Laternenöl	65°
» » 60—78°	—39°	Putzöl	65°
Benzin Siedepunkt 70—88°	—35°	Gasöl	80°
» » 80—100°	—22°	Achsenöl (Sommeröl)	160°
» » 80—115°	—20°	Achsenöl (Winteröl)	140°
» » 100—150°	+10°	Stellwerksöl	160°
Leichtpetroleum	21—40°	Turbinenöl	180°
Schwerpetroleum	30—50°	Motorenzylinderöl	180°
Gasöl, leicht	50—80°	Kompressorenöl	200°
» , schwer	70—120°	Naßdampfzylinderöl	260°
Vaseline	150—180°	Heißdampfzylinderöl	300°
Destillationsrückstand	120—200°	Dieselmotorentreiböl	65—145°
		Mineralheizöl	65—145°
		Alkohol 100% ²⁾	12
		» 94%	18
		» 70%	22
		» 50%	26,5

¹⁾ Anforderungen der Deutschen Reichsbahn A.-G.
²⁾ Gewichtsprocente Alkohol in Gemisch mit Wasser.

27. Zündgrenzen von Gasen und Dämpfen.

a) Begriff.

Die Zündgrenzen eines brennbaren Gases oder Dampfes in Mischung mit Luft oder einer anderen Sauerstoff enthaltenden Atmosphäre stellen die untere und obere Grenzkonzentration dar, innerhalb deren Bereich das Gemisch bei Zuführung einer genügend großen Energiemenge (in Form von Wärme, elektrischer Zündung oder Sprengstoffzündung) zur Entzündung gebracht werden kann.

Die untere bzw. obere Zündgrenze *L* eines Brenngas-Luft-Gemisches läßt sich mit genügender Genauigkeit errechnen nach der Gleichung von Le Chatelier:

$$L = \frac{100}{\frac{p_1}{n_1} + \frac{p_2}{n_2} + \frac{p_3}{n_3} + \dots}$$

Darin bedeuten p_1, p_2, p_3 usw. den Prozentgehalt der einzelnen Gase im Brenngasgemisch ($p_1 + p_2 + p_3 + \dots = 100$) und n_1, n_2, n_3 usw. die untere bzw. obere Zündgrenze dieser Einzelgase in reinem Zustand im Gemisch mit Luft.

Rechnungsbeispiel: Berechnung der unteren Zündgrenze eines Erdgases.

Gaszusammensetzung	untere Zündgrenze der Einzelgase
80% CH ₄	5,0%
15% C ₂ H ₆	3,0%
4% C ₃ H ₈	2,1%
1% C ₄ H ₁₀	1,5%

$$L = \frac{100}{\frac{80}{5} + \frac{15}{3} + \frac{4}{2,1} + \frac{1}{1,5}} = 4,25\%$$

b) Zündgrenzen reiner Gase im Gemisch mit Luft bei 20°
und 1 at.
Vol.-%.

Gas	untere Zündgrenze	obere Zündgrenze	Gas	untere Zündgrenze	obere Zündgrenze
Wasserstoff	4,1	75	Butylen	1,7	9,0
Kohlenoxyd	12,5	75	Azetylen	2,3	82
Methan	5,0	15	Cyan	6,6	42,6
Äthan	3,0	14	Cyanwasserstoff	12,75	27
Propan	2,1	9,5	Kohlenoxysulfid	11,9	28,5
Butan	1,5	8,5	Ammoniak	15,7	27,4
Äthylen	3,0	33,3	Schwefelwasserstoff	4,3	45,5
Propylen	2,2	9,7			

c) Zündgrenzen reiner Gase im Gemisch mit Sauerstoff bei
20° und 1 at.
Vol.-%.

Gas	untere Zündgrenze	obere Zündgrenze	Gas	untere Zündgrenze	obere Zündgrenze
Wasserstoff	4,5	95	Äthylen	3,0	80
Kohlenoxyd	13	96	Propylen	—	53
Methan	5	60	Butylen	—	—
Äthan	3,9	50,5	Azetylen	2,8	93
Propan	—	—	Ammoniak	14,8	79
Butan	—	—			

d) Zündgrenzen technischer Gase im Gemisch mit Luft bei
20° und 1 at.
Vol.-%.

Gas	Zündgrenzen	Gas	Zündgrenzen
Erdgas	4,5—13,5	Ölgas	3,4—7,8
Generatorgas	35—75	Stadtgas	6—35
Gichtgas	40—65	Steinkohlengas	5—30
karb. Wassergas	6—38	Wassergas	6—70

e) Zündgrenzen von Dämpfen im Gemisch mit Luft. Vol.-%.

Stoff	Zündgrenzen	Stoff	Zündgrenzen
n-Pentan	1,3—	Methylformiat	5 —28
i-Pentan	1,3—	Methylazetat	4 —14
Amylen	1,3—	Äthylformiat	3,5 —16,5
n-Hexan	1,2—	Äthylazetat	2,2 —11,5
n-Heptan	1,1—	Äthylnitrit	3,0 —50
n-Oktan	1,0—	Methylchlorid	8 —19
n-Nonan	0,8—	Methylbromid	13,5 —14,5
Gasolin	1,4—8	Äthylchlorid	4 —15
Benzin	1,2—7	Äthylbromid	6,75—11,25
Methanol	7 —37	Äthylendichlorid	6,2 —16
Äthylalkohol	3,5—20	Dichloräthylen	6,2 —16
Propylalkohol	2,5	Bleitetramethyl	1,8 —
Butylalkohol	1,0—	Zinntetramethyl	1,9 —
Äthyläther	1,7—48	Diäthylselenid	2,5 —
Divinyläther	1,7—28	Benzol	1,4 —9,5
Azetaldehyd	4 —57	Toluol	1,3 —7
Äthylenoxyd	3 —80	Zylohexan	1,3 —8,5
Dioxan	2 —22,5	Pyridin	1,8 —10
Azeton	2 —13	Furfural	2,1 —
Methyläthylketon	2 —12	Schwefelkohlenstoff	1 —50
Essigsäure	4 —		

28. Löschdruck von Gasen.

a) Begriff.

Der Löschdruck eines Gases gibt den Druck an, bei dem eine Flamme (infolge einer zu hohen Ausströmungsgeschwindigkeit) sich von der Brennermündung abzuheben beginnt.

Bei Flammen ohne Primärluftzugabe verwendet man hierbei als Standardbrenner einen Einlochbrenner von 0,75 mm Bohrung (0,44 mm² Querschnitt).

Im einzelnen sind bei verschiedenen reinen und technischen Gasen bisher folgende Werte für den Löschdruck ermittelt worden.

Bei entleuchteten Flammen (Bunsenflammen) sind Werte für den Löschdruck bisher nicht bestimmt worden. Sie liegen wesentlich höher als die von Gasen ohne Luftzusatz und werden wahrscheinlich im wesentlichen von der Zündgeschwindigkeit des betreffenden Gas-Luft-Gemisches bestimmt.

b) Löschdruck verschiedener reiner und technischer Gase.

	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	Städt- gas	Wasser- gas
Löschdruck	2650	4,4	5,6	115	21,5	17,5	823	816
max. Gasvolumen	216	3,0	4,7	15	5,8	4,6	61	50
» »	658	9,1	44,7	229	140	141	268	138
Gasgeschwindigkeit	488	6,8	10,5	38	13,2	10,4	137	113
max. Flammenhöhe	50,0	2,5	17,5	30,1	27,3	28	26,4	33,5
zugehöriger Druck	45	4,4	5,6	7,0	20,5	16,5	180	550
» Gasvolumen	89	3,0	4,7	12	5,7	4,5	28	41
erzeugte Wärmemenge cal/s	230	9,1	40,0	179	138	138	140	110
Flammenvolumen	30	0,5	20	15	15,5	17,9	18,5	6,5

c) Löschdruck verschiedener Dämpfe. (Einlochbrenner von 0,1 mm Durchmesser.)

⌈ (Nach G. Tammann und H. Thiele; Ztschr. f. anorgan. Chem. 192, 65, 1930.)

Methylalkohol	23 mm WS	Paraldehyd	55 mm WS
Äthylalkohol	19 » »	Amylen	204 » »
Propylalkohol	39 » »	Heptan	314 » »
Butylalkohol	44 » »	Benzol	204 » »
Amylalkohol	65 » »	Toluol	232 » »
Essigsäure)	5 » »	m-Xylol	177 » »
Propionsäure	9 » »	Naphthalin	109 » »
Buttersäure	10 » »	Terpentin	514 » »
Valeriansäure	10 » »	Benzoessäure	45 » »
Azetaldehyd	55 » »	Chlorbenzol	5 » »

29. Zündgeschwindigkeit und Verbrennungsdichte (spezifische Flammenleistung) technischer Gase.

Die stetig zunehmende Anwendung des Gases als Wärmeträger auf den verschiedenen technischen Gebieten erfordert eine genaue Kenntnis der brenntechnischen Eigenschaften der verschiedenen Gase, die sich für die technische Gasverwendung eignen. Hierbei stellt oft die Gasflamme als solche einen Teil des Arbeitsgerätes dar. Daraus ergibt sich wiederum, daß auf diesem Anwendungsgebiet nur die wärmetechnischen und brenntechnischen Eigenschaften der Gase von Bedeutung sind. Die ersteren werden vornehmlich bestimmt durch den Heizwert und die spezifische Wärme bzw. den Wärmeinhalt der Verbrennungsprodukte, die rechnerisch die Grenztemperatur zu ermitteln ermöglichen.

a) Zündgeschwindigkeit der Gase.

Die Grundlage der eigentlichen Brenneigenschaften bildet die »Zündgeschwindigkeit« der Gase, ohne daß diese jedoch einen allumfassenden Maßstab für die Brennbedingungen ergibt.

Die Zündgeschwindigkeit, zum Teil auch Verbrennungs- oder Fortpflanzungsgeschwindigkeit genannt, bildet ein Charakteristikum sämtlicher brennbarer Gas-Luft- bzw. Gas-Sauerstoff-Gemische. Ihre Messung kann entweder auf statischem oder dynamischem Wege erfolgen. Im ersteren Falle wird die Geschwindigkeit bestimmt, mit der die Zündung bzw. Verbrennung in einer ruhenden Gassäule sich fortpflanzt. Die dabei erhaltenen Werte sind jedoch von verschiedenen Faktoren, wie der Rohrbreite und der Strömungsrichtung der Zündbewegung ab-

hängig. Die für die exakte Messung der Zündgeschwindigkeit besser geeignete dynamische Meßmethode nach Gouy und Michelson beruht auf folgendem Prinzip¹⁾:

Wenn ein Gas-Luft- bzw. Gas-Sauerstoff-Gemisch beliebiger Zusammensetzung mit laminarer Strömung aus einem Brennerrohr auströmt und auf der Brennermündung abbrennt, erhält man die Bunsenflamme, die aus einem inneren Verbrennungskegel mit nachfolgender Sekundärverbrennung, der sichtbaren Flamme, besteht. Auf der Kegelmantelfläche findet gemäß dem Sauerstoffgehalt des Brenngas-Luft-Gemisches die Primärverbrennung bzw. z. T. ein Abbau der Gase zu den sog. verbrennungsreifen Gasen Kohlenoxyd und Wasserstoff, in der eigentlichen Flamme darauf infolge Diffusion von Luftsauerstoff die Sekundärverbrennung des Gasüberschusses statt. Bei der Bunsenflamme wird hierbei stets ein Gas-Luft-Gemisch mit einem Überschuß an Gas angewendet, um eine Sekundärverbrennung, die als Flammenvolumen sichtbar ist, zu erzielen. Bei einer Brenngaskonzentration im Gemisch, die der theoretischen Verbrennung entspricht, kommt die Sekundärverbrennung in Wegfall bzw. man erhält als »Flamme« nur ein Nachleuchten der Abgase der Verbrennung über der Kegelmantelfläche. Wenn die Flammentemperatur auf der letzteren sehr hoch ist und eine teilweise Dissoziation der Verbrennungsabgase zur Folge hat, erfolgt in der Flamme ferner die Nachverbrennung der rückgebildeten Gase Wasserstoff und Kohlenoxyd.

Auf der Kegelmantelfläche ist somit die Ausströmungsgeschwindigkeit des Gas-Luft-Gemisches gleich groß der entgegengerichteten Zündgeschwindigkeit u und beide halten sich auf dieser Fläche das Gleichgewicht:

$$u = \frac{\text{In der Zeiteinheit zugeführtes Gas-Luft-Volumen}}{\text{Brennfläche}} = \frac{V}{S}$$

$$S = \pi \cdot r \cdot \sqrt{r^2 + h^2} \quad (h = \text{Höhe des Brennskegels}).$$

Auf dieses Prinzip gründet sich die dynamische Meßmethode der Zündgeschwindigkeit, wobei man bei Einhaltung einer laminaren Strömung¹⁾ Absolutwerte erhält. Diese bilden gleichzeitig den unteren Grenzwert für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Verbrennung von Gas-Luft-Gemischen, die infolge Turbulenz oder anderer Erscheinungen stets größer als die eigentliche Zündgeschwindigkeit ist.

In dem nachfolgenden Flammenvolumen findet daraufhin die Sekundärverbrennung des Restgases mit einer nicht bestimmbar Fortpflanzungsgeschwindigkeit u_{f_m} statt.

¹⁾ Einzelheiten über die experimentelle Bestimmung der Zündgeschwindigkeit s. Bd. V »Gasuntersuchungsmethoden«.

Wenn die Strömungsgeschwindigkeit des Gas-Luft-Gemisches kleiner ist als die entgegengerichtete Zündgeschwindigkeit, so schlägt die Flamme in das Brennerrohr zurück. Theoretisch entspricht die kleinste Kegelmantelfläche bei Kegelhöhe = 0 dem Brennerrohrquerschnitt (Kreisfläche), d. h. auf dem Querschnitt der Brennerrohrmündung halten sich die Strömungsgeschwindigkeit und Zündgeschwindigkeit das Gleichgewicht. Eine derartige Flamme kann man mit technischen Brennern jedoch nicht erzielen, obwohl sie dem theoretischen Grenzfall des Rückschlagens der Flamme entspricht. Hierbei auftretende Turbulenzerscheinungen bewirken praktisch vielmehr noch bei einer etwas höheren Strömungsgeschwindigkeit stets ein Rückschlagen. Erst, wenn bezogen auf den Brennerrohrquerschnitt, die Strömungsgeschwindigkeit des Gas-Luft-Gemisches größer wird, bildet sich als Zone der Primärverbrennung über der Brennermündung ein Kegel aus, auf dessen Mantelfläche die Primärverbrennung stattfindet. Bei einer weiteren Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit verlängert sich die Kegelhöhe immer mehr, bis schließlich ein Abheben der Flamme eintritt.

In der Praxis verwendet man Strömungsgeschwindigkeiten, die zwischen diesen beiden Grenzfällen des Rückschlagens und Abhebens der Flamme liegen. Wenn in einer technischen Gasfeuerung eine gleichmäßige Wärmeverteilung über einen größeren Raum erfolgen soll, wählt man eine nur geringe Primärluftzugabe und damit eine geringere Zündgeschwindigkeit, mit der eine größere Kegel- und Flammenlänge erzielt wird. In den Fällen, bei denen eine hohe Wärmekonzentration auf einen kleinen Raum verlangt wird, benötigt man andererseits einen kurzen Kegel und eine kurze Flamme, also ein Gas-Luft-Gemisch mit hoher Zündgeschwindigkeit.

Die Zündgeschwindigkeiten der wichtigsten reinen Gase in Abhängigkeit vom Gas-Luft- bzw. Gas-Sauerstoff-Verhältnis sind in den nächstehenden Abbildungen 4 und 5 zusammengestellt. Bereits in Abb. 4 erkennt man die außerordentlich hohe Zündgeschwindigkeit des Wasserstoffs, während die des Kohlenoxyds und Methans sehr niedrig liegen. Azetylen nimmt hierbei eine Zwischenstellung ein. Wichtig ist ferner, daß die Maxima der Zündgeschwindigkeiten stets im Gebiet des Gasüberschusses liegen. Dies wirkt sich vor allem bei Kohlenoxyd und Wasserstoff aus, bei denen das Maximum der Zündgeschwindigkeit bei

¹⁾ Eine laminare (nicht turbulente) Strömung ist gegeben, wenn die Reynoldssche Zahl Re kleiner als 2300 ist.

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$$

(w = Strömungsgeschwindigkeit cm^3/s , d = Rohrdurchmesser cm , ν = kinematische Zähigkeit m^2/s).

$$\text{Kritische Geschwindigkeit } w_k = \frac{2300 \cdot \nu}{d}$$

51 bzw. 43% Gas im Gas-Luft-Gemische liegt gegenüber 29,5% bei theoretisch vollkommener Verbrennung. Bei Kohlenwasserstoffen verschiebt sich mit steigendem Molekulargewicht das Maximum der Zündgeschwindigkeit immer mehr nach dem theoretischen Mischungsverhältnis für vollkommene Verbrennung.

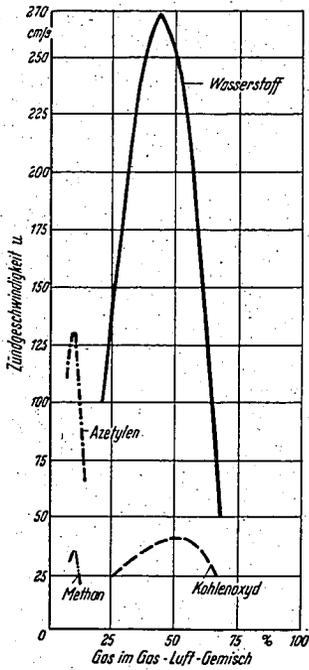


Abb. 4. Zündgeschwindigkeit von Gas-Luft-Gemischen.

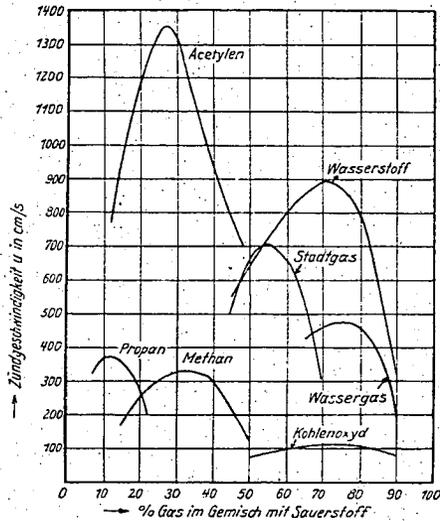


Abb. 5. Zündgeschwindigkeit von reinen und technischen Gasen bei Verbrennung mit Sauerstoff.

Höchste Zündgeschwindigkeit verschiedener Gase bei Verbrennung mit Sauerstoff und mit Luft.

	Höchste Zündgeschwindigkeit		Verhältnis
	mit Sauerstoff	mit Luft	
Wasserstoff	890	267	3,34 : 1
Kohlenoxyd	110	33	3,34 : 1
Methan	330	35	9,44 : 1
Azetylen	1350	131	10,3 : 1
Propan	370	32	11,6 : 1
Wassergas	470	160	7,94 : 1
Stadtgas	705	64	11,0 : 1

Die Zündgeschwindigkeit der technischen Gasgemische wird durch die der darin enthaltenen Einzelgase bestimmt. Infolge der gegenseitigen Reaktionsbeeinflussung bei der Verbrennung von Gasgemischen stellt die Zündgeschwindigkeit der letzteren jedoch nicht genau

das Mittel der der Einzelbestandteile dar. Für das System Wasserstoff-Kohlenoxyd-Methan, die die wesentlichsten Inhaltsstoffe aller technischen Gasgemische darstellen, haben Bunte und Litterscheidt¹⁾ die maximalen Zündgeschwindigkeiten in der Form eines Dreiecks graphisch wiedergegeben (Abb. 6). Aus diesem Bild kann man daraufhin mit ziem-

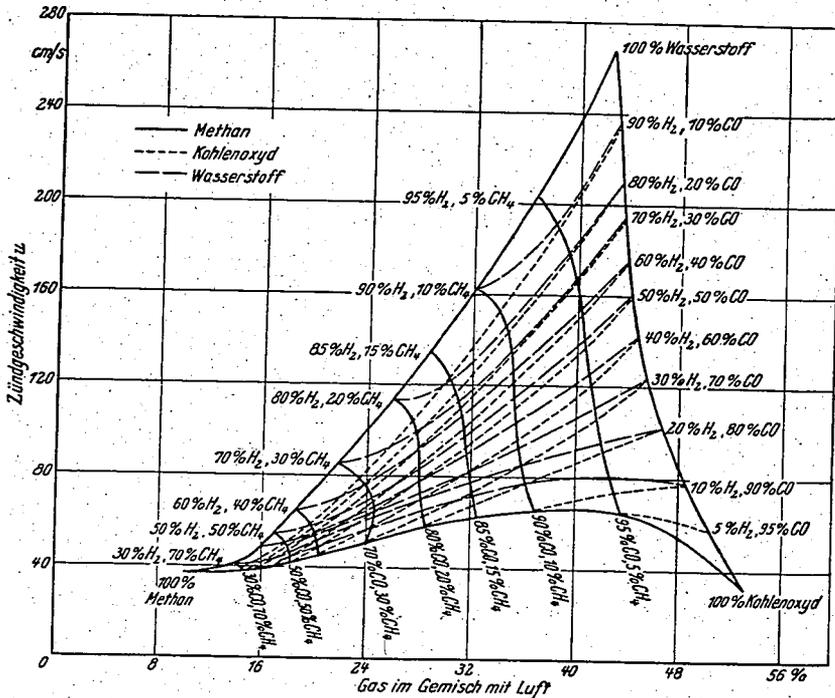


Abb. 6. Zündgeschwindigkeit von Wasserstoff-Kohlenoxyd-Methan-Gemischen in Mischung mit Luft.

licher Annäherung die maximale Zündgeschwindigkeit nahezu sämtlicher technischer Gase entnehmen. Dabei müssen jedoch die Inertgasbestandteile als zündgeschwindigkeitshemmend berücksichtigt werden.

In Abb. 7 sind Zündgeschwindigkeitskurven je eines typischen Steinkohlengases, Stadtgases, Wassergases und Generatorgases zusammengestellt. Allgemein gilt, daß die höchste Zündgeschwindigkeit eines Steinkohlengases durchschnittlicher Zusammensetzung etwa 65 bis 70 cm/s, eines Stadtgases 70 bis 85 cm/s, eines Wassergases 130 bis 160 cm/s, eines Generatorgases 30 bis 35 cm/s beträgt. Ein ansteigender

¹⁾ Gas- und Wasserfach 73, 837 (1930); daselbst weitere Literatur.

Gehalt der Gase an Wasserstoff erhöht, vermehrter Inertgehalt erniedrigt diese Werte. So wird die höchste Zündgeschwindigkeit eines Stadtgases durch einen übermäßig hohen Gehalt an Stickstoff von etwa 15% bei sonst durchschnittlicher Zusammensetzung auf rd. 62 bis 66 cm/s herabgesetzt, wobei sich gleichzeitig das zugehörige Gas-Luft-Verhältnis der höchsten Zündgeschwindigkeit von etwa 25 auf 21% Gas im Brenngas-Luft-Gemisch verschiebt.

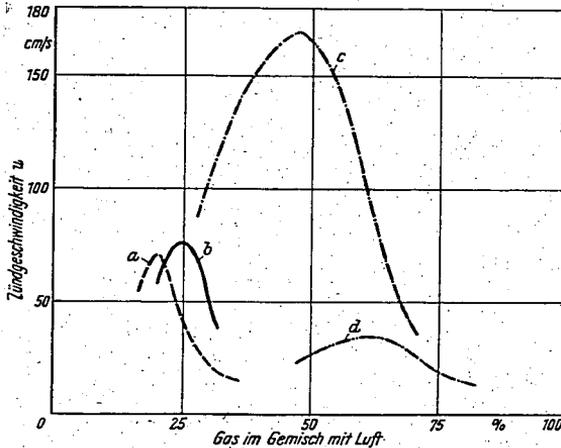


Abb. 7. Zündgeschwindigkeit von verschiedenen technischen Gasen im Gemisch mit Luft.

Gas	Gehalt an						
	CO ₂ % _o	skW % _o	O ₂ % _o	CO % _o	H ₂ % _o	CH ₄ % _o	N ₂ % _o
a	1,6	3,6	1,0	5,5	54,5	27,2	6,6
b	4,5	2,4	0,2	20,8	51,8	14,9	5,4
c	0,2	—	0,4	47,0	50,5	—	1,9
d	4,4	—	—	29,1	10,2	—	56,3

b) Verbrennungsdichte (spezifische Flammenleistung) der Gase.

Die auf der Kegelmantelfläche entwickelte Wärmemenge (kcal/s) ergibt sich als der latente Wärmehalt des zugeführten Brenngas-Luft-Gemisches, soweit dessen Sauerstoffgehalt zu der Primärverbrennung ausreicht. Die gesamte von der Flamme entwickelte Wärmemenge (kcal/s) entspricht dagegen dem gesamten latenten Wärmehalt des Gas-Luft-Gemisches. Das Gas-Luft-Volumen, das in der Zeiteinheit einem Brenner zugeführt werden kann, ist bestimmt durch die Zündgeschwindigkeit desselben. Man erkennt daraus, daß für die Erzielung einer hohen Verbrennungsdichte bzw. Flammenleistung ein Gas

von hoher Zündgeschwindigkeit notwendig ist, während mit geringerer werdender Zündgeschwindigkeit bei Zuführung eines gleichen Gas-Luft-Volumens der Flammenkegel immer mehr verlängert wird. Die Brenneigenschaften eines Gases werden somit wesentlich von dessen Zündgeschwindigkeit bestimmt. Diese allein genügt jedoch nicht für das brenntechnische Verhalten eines Gases, da dieses von dem Heizwert desselben mitbestimmt wird.

Die vergleichende Beurteilung der Brenneigenschaften eines Gases ist möglich geworden durch die Schaffung des Begriffes der spezifischen Flammenleistung¹⁾. Die spezifische Flammenleistung J_s eines Brenngases ist die Wärmeleistung, die dieses Gas in einem Normalbrenner von 1,428 cm Durchmesser entsprechend 1 cm² Querschnitt bei bestimmter Kegelhöhe in Abhängigkeit von dem Brenngas-Luft-Mischungsverhältnis erzeugt (kcal/cm²s). Die gesamte spezifische Flammenleistung J_s stellt dabei die Summe der durch Primärverbrennung im Flammenkegel erzeugten spezifischen primären Flammenleistung J_s' und der durch Sekundärverbrennung des Brenngasüberschusses mit Zweitluft erzeugten spezifischen sekundären Flammenleistung J_s'' dar. Die erzeugte Wärmemenge ist abhängig von dem gesamten unteren Heizwert W (kcal/cm³) des ausströmenden Gas-Luft-Gemisches V . Auf der Kegelmantelfläche S (cm²) der Bunsenflamme ist die Zündgeschwindigkeit des Gas-Luft-Gemisches gleich groß und nur entgegengerichtet der Strömungsgeschwindigkeit und beträgt

$$u = \frac{V}{S} \text{ cm/s.}$$

Da S durch die Gleichung

$$S = \pi \cdot r \sqrt{r^2 + h^2}$$

(r = Brennerrohrquerschnitt, h = Kegelhöhe)

ausgedrückt werden kann, erhält man somit

$$u = \frac{V}{\pi \cdot r \sqrt{r^2 + h^2}} \text{ cm/s.}$$

Zwischen der Strömungsgeschwindigkeit w und der Zündgeschwindigkeit u , sowie zwischen Brennerquerschnitt F und Kegelmantelfläche S gilt die Beziehung

$$\frac{u}{w} = \frac{F}{S} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}} = k.$$

Diese Kennziffer k bedeutet somit das Verhältnis zwischen Brennerquerschnitt und Brennfläche (Kegelmantelfläche). Die Grenzen von k sind 0 und 1. Bei $k = 0$ wird die Brennfläche und damit die Kegelhöhe un-

¹⁾ H. Brückner und G. Jahn, Gas- und Wasserfach 74, 1022 (1931), II. Brückner und H. Löhr, Gas- und Wasserfach 79, 17 (1936).

endlich groß, bei $k = 1$ verkürzt sich die Brennfläche zum Brennerquerschnitt. Beide Grenzwerte können praktisch nicht erreicht werden. Für die gesamte spezifische Flammenleistung J_s gelten dann bei gewähltem k die Gleichungen:

$$J_s = \frac{V \cdot W}{F} \quad \text{bzw.} \quad J_s = \frac{W \cdot u}{k} \quad \text{kcal/cm}^2\text{s,}$$

für die spezifische primäre und sekundäre Flammenleistung entsprechend

$$J_s' = \frac{W' \cdot u}{k} \quad \text{und} \quad J_s'' = \frac{W'' \cdot u}{k}.$$

Darin bedeutet W' (kcal/cm³) den unteren Heizwert des ausströmenden Gas-Luft-Gemisches, soweit eine Verbrennung durch im Gemisch enthaltenen Luftsauerstoff möglich ist und $W'' = W - W'$.

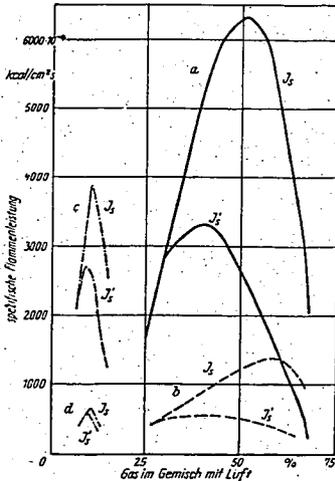


Abb. 8 a. Flammenleistung von Einzelgasen im Gemisch mit Luft.

- | | |
|---------------|------------------|
| a Wasserstoff | d Methan |
| b Kohlenoxyd | e Steinkohlengas |
| c Azetylen | f Stadtgas |

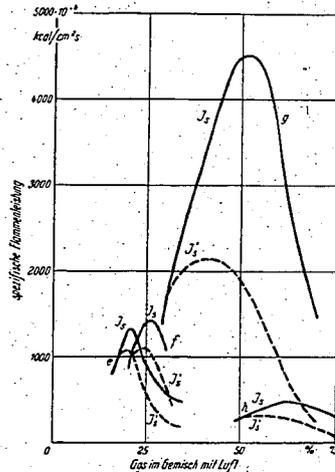


Abb. 8 b. Flammenleistung von technischen Gasen im Gemisch mit Luft.

- | | |
|----------------|---------------------------|
| g Wassergas | J_s Gesamtlammenleistung |
| h Generatorgas | J_s' Primärlammenleistung |

Bei laminarer Strömung ist eine Bunsenflamme durch die Kennziffer k hinsichtlich der Oberflächengröße S des Flammenkegels und der Kegelhöhe h bei festgelegtem Brennerquerschnitt definiert. Trotz Änderung der Größe von k erhält man jeweils bei einem bestimmten gleichbleibenden Mischungsverhältnis Gas:Luft ein Maximum der spezifischen Flammenleistung. Für den Normalbrenner von 1 cm² Querschnitt hat es sich zweckmäßig erwiesen, $k = 0,5$ festzulegen. Unter diesen Bedingungen beträgt die Kegelfläche der Bunsenflamme 2 cm². Die Beurteilung

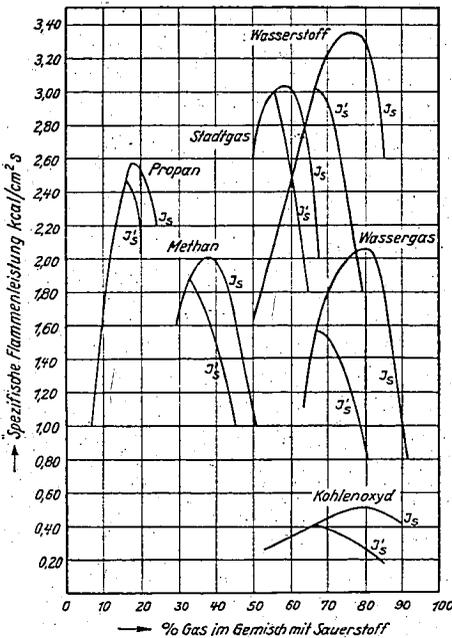


Abb. 9. Flammenleistung von reinen und technischen Gasen bei Verbrennung mit Sauerstoff.

J = Gesamtlammenleistung
 J' = Primärlammenleistung.

der Flammenleistungen verschiedener Gase erfolgt stets nach dieser Methode, indem Flammen mit gleicher Kegellänge unter Anwendung des Normalbrenners verglichen werden. Bei Zugrundelegung anderer Flammenmaße werden diesen proportionale Ergebnisse erhalten. Die Flammenleistung eines Gases kann theoretisch über den gesamten Zündbereich des Gas-Luft-Gemisches errechnet werden. Die praktischen Grenzen der Möglichkeit einer Bestimmung der zugrunde liegenden Zündgeschwindigkeit sind jedoch erheblich enger, vor allem im Gebiet zwischen der unteren Zündgrenze und dem Gas-Luft-Gemisch mit der höchsten Zündgeschwindigkeit, da eine Messung der Zündgeschwindigkeit kaum unterhalb des letzteren möglich ist. Die Entwicklung der Aufstellung der Kurven der spezifischen Gesamt- und der primären Flammenleistung J_s bzw. J'_s wird in der nachstehenden Zahlentafel für Wasserstoff gegeben.

Spezifische Flammenleistung von Wasserstoff bei Verbrennung mit Luft.

% Gas in Luft	u cm/s	W kcal/cm ²	W' kcal/cm ²	J_s kcal/cm ² s	J'_s kcal/cm ² s
25	140	$630 \cdot 10^{-6}$	$630 \cdot 10^{-6}$	$1765 \cdot 10^{-4}$	$1765 \cdot 10^{-4}$
29,5 a)	186	$745 \cdot 10^{-6}$	$745 \cdot 10^{-6}$	$2770 \cdot 10^{-4}$	$1770 \cdot 10^{-4}$
35	231	$880 \cdot 10^{-6}$	$688 \cdot 10^{-6}$	$4070 \cdot 10^{-4}$	$3180 \cdot 10^{-4}$
40 b)	261	$1010 \cdot 10^{-6}$	$635 \cdot 10^{-6}$	$5270 \cdot 10^{-4}$	$3320 \cdot 10^{-4}$
45	266	$1135 \cdot 10^{-6}$	$582 \cdot 10^{-6}$	$6030 \cdot 10^{-4}$	$3090 \cdot 10^{-4}$
50	280	$1260 \cdot 10^{-6}$	$528 \cdot 10^{-6}$	$6300 \cdot 10^{-4}$	$2645 \cdot 10^{-4}$
51 c)	246	$1285 \cdot 10^{-6}$	$519 \cdot 10^{-6}$	$6320 \cdot 10^{-4}$	$2550 \cdot 10^{-4}$
55	221	$1387 \cdot 10^{-6}$	$478 \cdot 10^{-6}$	$6120 \cdot 10^{-4}$	$2110 \cdot 10^{-4}$
60	168	$1512 \cdot 10^{-6}$	$425 \cdot 10^{-6}$	$5080 \cdot 10^{-4}$	$1430 \cdot 10^{-4}$

- a) Gemisch für theoretisch vollkommene Verbrennung.
- b) Gemisch mit höchster primärer Flammenleistung.
- c) Gemisch mit höchster Gesamtlammenleistung.

Die spezifischen Flammenleistungskurven verschiedener reiner und technischer Gase bei Verbrennung mit Luft und mit Sauerstoff sind in

den Abb. 8 und 9 wiedergegeben und in den nachfolgenden Zahlentafeln sind ferner die Höchstwerte zusammengestellt.

Höchste spezifische Flammenleistung von reinen und technischen Gasen bei Verbrennung mit Luft.

Gas	% Gas- im Gemisch	Spez. primäre Flammenleistg. kcal/cm ² s	% Gas im Gemisch	Spez. Gesamt- flammenleistg. kcal/cm ² s
Wasserstoff	40	3320 · 10 ⁻⁴	51	6320 · 10 ⁻⁴
Kohlenoxyd	42	550 · 10 ⁻⁴	58	1380 · 10 ⁻⁴
Methan	10,5	580 · 10 ⁻⁴	11	680 · 10 ⁻⁴
Azetylen	9	2700 · 10 ⁻⁴	11	3880 · 10 ⁻⁴
Steinkohlengas	20	1080 · 10 ⁻⁴	21	1340 · 10 ⁻⁴
Stadtgas	24,5	1110 · 10 ⁻⁴	26	1450 · 10 ⁻⁴
Wassergas	41	2160 · 10 ⁻⁴	52	4520 · 10 ⁻⁴
Generatorgas	57	330 · 10 ⁻⁴	63	500 · 10 ⁻⁴

Spezifische Flammenleistung verschiedener Gase bei Verbrennung mit Sauerstoff.

Gas	Höchste spez. Flammenleistung kcal/cm ² /s	v. H. Gas im Ge- misch mit O ₂ bei der höchsten spez. Flammenleistung
Wasserstoff	3,34	75
Kohlenoxyd	0,50	79
Methan	2,01	38
Azetylen	10,7	30
Propan	2,56	18
Wassergas	2,06	80
Stadtgas	3,03	58

Daraus ist beispielsweise die überragende spezifische Flammenleistung des Azetylens, die mehr als das Zehnfache der des Kohlenoxyds beträgt und die hohe des Wasserstoffs ersichtlich. Sehr gering ist die des Methans. Ferner erkennt man ohne weiteres die starke Abhängigkeit der spezifischen Flammenleistung von dem Mischungsverhältnis Gas:Luft.

Die Flammenleistung technischer Gase wird naturgemäß von der der Einzelgase bestimmt. Somit muß die des Wassergases trotz gleichen Wasserstoffgehaltes erheblich höher sein als die des Steinkohlen- oder Stadtgases, da im letzteren Fall die erheblich geringere Flammenleistung des Methans und der höhere Inertgasgehalt erniedrigend wirkt. Am geringsten ist die spezifische Flammenleistung des Generatorgases infolge des hohen Inertgasgehaltes. Diese kann durch Vorwärmung jedoch erheblich gesteigert werden.

Bei Vorwärmung von Gas und Luft erfährt die Gleichung der spezifischen Flammenleistung eine Umgestaltung folgender Art. Die Zünd-

geschwindigkeit u erhöht sich mit steigender Temperatur zu u_t , wobei $u_t \geq u$ ist. Ferner ist die der Zeiteinheit zugeführte Wärmemenge W zu untergliedern in den Heizwert und den fühlbaren Wärmehalt des zugeführten Gas-Luft-Gemisches. Da die Zündgeschwindigkeit u_t bei der Temperatur t gemessen wird, erniedrigt sich der Heizwert W (kcal/cm³) des Gas-Luft-Gemisches zu $W \cdot \frac{T}{273}$ (kcal/cm³). Hierzu kommt jedoch die fühlbare Wärme des Gas-Luft-Gemisches je cm³, also $1 \cdot c_{pm} \cdot t \cdot 10^{-6}$ kcal.

Die Gleichung ändert sich demnach wie folgt:

$$J_s = \frac{\left(W \cdot \frac{T}{273} + 1 \cdot c_{pm} \cdot t \cdot 10^{-6} \right) \cdot u_t}{k}$$

30. Lichtleistung und Lichtausbeute.

a) Begriff.

Die Lichtausbeute einer Lichtquelle wird beurteilt nach:

1. der mittleren räumlichen Lichtstärke I_0 in Hefnerkerzen (HK). Eine Hefnerkerze ist die Lichtstärke, die eine unter Normalbedingungen brennende (in Deutschland als Lichtnormal eingeführte) Hefnerkerze als Licht in Horizontalrichtung ausstrahlt. Ihre Gesamtstrahlung beträgt 0,0000215 cal = 900 Erg s⁻¹ cm⁻²;
2. dem in den gesamten Raum (Raumwinkel 4π) ausgestrahlten Lichtstrom Φ_0 in Lumen L_m bzw. in Lumenstunden. Ein Lumen wird von einer Lichtquelle mit der Lichtstärke 1 HK bei gleichmäßiger Strahlung in die Einheit des Raumwinkels ausgestrahlt. $\Phi_0 = 4\pi \cdot I_0$;
3. der Leuchtdichte Stilb. Die Leuchtdichte 1 Stilb ergibt sich, wenn die Lichtstärke 1 HK von einer ebenen Fläche von 1 cm² senkrecht von dieser abgestrahlt wird;
4. der Beleuchtungsstärke Lux. Die Beleuchtungsstärke 1 Lux ergibt sich, wenn der Lichtstrom 1 Lumen auf die Fläche 1 m² aufgestrahlt wird.

Wichtig ist ferner der Verbrauch an Brennstoff P/h (bei Gasen l/h, bei Flüssigkeiten g/h, bei elektrischen Lampen W/h), die bei Verbrennung des Brennstoffs (Zuführung des elektrischen Stromes) in der Zeiteinheit (h) entwickelte Wärmemenge V (kcal) und die in der Zeiteinheit (h) zur Unterhaltung des Leuchtens erforderliche Energie (Q).

Die Bewertung der Lichtquellen erfolgt

1. nach dem spezifischen Effektverbrauch $C_1 = P/I_0$, d. h. dem stündlichen Brennstoff- bzw. Stromverbrauch für 1 HK₀ bei mittlerer räumlicher Lichtstärke (für 1 sphärische Kerze);
2. nach der spezifischen Lichtleistung $C_2 = Q/I_0$ in W/HK₀,
3. nach der Lichtausbeute $C_3' = \Phi_0/Q$ oder $C_3'' = \Phi_0/V$.

In der nachfolgenden Zahlentafel sind die spezifische Lichtleistung C_2 und die Lichtausbeute C_3' nach Liebenthal¹⁾ für die wichtigsten Lichtquellen sowie für den sog. absolut schwarzen Körper bei 6500° abs, den Idealstrahler bei 4250° abs sowie für den Maximalstrahler wiedergegeben:

b) Spezifische Lichtleistung und Lichtausbeute verschiedener Lichtquellen.

Lichtquelle	Spez. Lichtleistung C_2 Watt/HK ₀	Lichtausbeute Lm/Watt	Lichtquelle	Spez. Lichtleistung C_2 Watt/HK ₀	Lichtausbeute Lm/Watt
Maximalstrahler	0,019	662	Gasgefüllte Metallfadenlampe . . .	0,7	18
idealstrahler bei 4250° abs . .	0,051	248	Reinkohlenbogenlampe . . .	1,0	13
Schwarzer Körper bei 6500° abs . .	0,14	90	Vakuum-Metallfadenlampe . . .	1,4	9,1
			Kohlenfadenlampe	3,4	3,7
Quecksilber-Quarzlampe . . .	0,30	38	Hängegasglühlicht	8,9	1,4
Flammenbogenlampe	0,4	31	Petroleumglühlicht	15	0,84
			Leuchtgas-Schnittbrenner	43	0,29
				100	0,13

¹⁾ Physikalisches Handwörterbuch, 2. Aufl. 1932, S. 1398.