

Über katalytische Einflüsse bei Selbstzündungsvorgängen.

Von Priv.-Dozent Dr. CARL ZERBE, Dr. FRANZ ECKERT und HERRMANN JENTZSCH, Kiel.

(Aus dem chemischen Institut der Universität Kiel.)

(Eingeg. 14. Juli 1933.)

In einer früheren Abhandlung¹⁾ konnten wir zeigen, daß Selbstzündungsvorgänge durch das Zusammenwirken der verschiedensten Faktoren beeinflusst werden; so stellten wir für die Selbstzündung von Kohlenwasserstoffen eine bestimmte Abhängigkeit von der Sauerstoffdichte der Umgebung, der Temperatur und der chemischen Konstitution fest. Die Versuche wurden in einem Zündwertprüfer nach Jentzsch mit einem Zündtiegel aus V₂A-Stahl durchgeführt, der eventuelle katalytische Einfluß des Apparatmaterials blieb unberücksichtigt.

Die zunehmende Bedeutung, die den Selbstzündungseigenschaften von Treibstoffen bei der Verbrennung im Motor zukommt, hat zu einem eingehenden Studium der katalytischen Einflüsse bei der Selbstzündung veranlaßt und zunächst zur Auffindung von den Selbstzündungspunkt (Szp.) heraufsetzenden Katalysatoren, sogenannten Antiklopfmitteln, geführt. In neuester Zeit ist es Broche, Ehrmann u. Scheer²⁾ gelungen, auch Katalysatoren zu finden, die den Szp. heruntersetzen vermögen.

Eine große Bedeutung haben die Selbstzündungsvorgänge auch bezüglich der Betriebssicherheit, da eine große Zahl von Explosionsunfällen und Feuerschäden auf Selbstzündung zurückzuführen ist. Wir haben deshalb eine größere Anzahl von Stoffen, die bei solchen Selbstzündungen mitwirken könnten, auf ihren katalytischen Einfluß geprüft. Um die Kontaktwirkung möglichst augenfällig zu machen, haben wir als Prüfstoff zwei Substanzen mit auf ihrer chemischen Konstitution beruhenden Selbstzündungseigenschaften gewählt, und zwar als Vertreter der Aliphaten das Pentan, bei dem sich die typischen Selbstzündungsvorgänge ohne Kontaktstoff in niedrigem, breitem Temperaturintervall abspielen, und als Vertreter der Aromaten das Benzol, das nur geringe Neigung zur Selbstzündung zeigt. Durch Bestimmung des „Selbstzündungspunktes“³⁾ von Benzol und des „oberen Zündwertes“³⁾ von Pentan konnten wir zunächst feststellen, inwieweit wirksame Katalysatoren imstande waren, die Selbstzündungsvorgänge zu hemmen oder zu beschleunigen. Da bei unserer Arbeitsweise die meisten auf ihre Kontaktwirkung zu prüfenden Metalle mehr oder weniger in Oxydform übergehen, gingen wir direkt von den Oxyden aus, um die Einheitlichkeit der Art der Kontaksubstanz sicherzustellen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Die Zusammenstellung, die naturgemäß nur einen kleinen Teil von Stoffen mit Kontaktwirkung enthält, zeigt, insbesondere wenn man die von Broche und Mitarbeitern⁴⁾ als wirksam erkannten Kontaktstoffe (Sauerstoffverbindungen von Cer, Thorium, Vanadium, Platinasbest) hinzurechnet, daß die Zahl der die Selbstzündungsvorgänge katalytisch beeinflussenden Stoffe verhältnismäßig groß ist, und daß selbst solche Stoffe wirksam sind, von denen eine katalytische Aktivität nur selten beobachtet wurde (Calciumoxyd, Magnesiumoxyd, Zinnsäure).

Da sich der Einfluß der Sauerstoffdichte der Umgebung, der Temperatur sowie der chemischen Konsti-

tution des Prüfstoffes auf die Wirksamkeit eines Kontaktes nur in einer Selbstzündungskurve deutlich zum Ausdruck bringen läßt, haben wir für einige als besonders wirksam erkannte Kontaktstoffe solche Kurven

Tabelle 1.

Selbstzündungspunkt von Benzol (thiophenfrei). Oberer Zündwert von Pentan mit verschiedenen Kontaktstoffen.

| Kontaktstoff | Selbstzündungspunkt von Benzol °C | Oberer Zündwert von Pentan °C |
|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Ohne Kontakt | 690 | 580 |
| Palladiumasbest, 25% | 290 | 680 |
| Kobaltoxyd | 290 | 690 |
| Uranoxyd | 410 | 690 |
| Cadmiumoxyd | 430 | 680 |
| Manganoxyd | 450 | 690 |
| Nickeloxyd | 450 | 690 |
| Magnesiumoxyd | 470 | 680 |
| Zinkoxyd | 480 | 680 |
| Zinnsäure | 500 | 690 |
| Bleioxyd, rot | 500 | 690 |
| Chromoxyd | 560 | 680 |
| Calciumoxyd | 560 | 690 |
| Eisenoxyd | 570 | 680 |
| Wismutoxyd | 560 | 670 |
| Vanadinpentoxyd | 640 | 600 |
| Aluminiumoxyd | 660 | 580 |
| Bleioxyd, gelb | 670 | 610 |
| Kupferoxyd | 680 | 680 |
| Blei | siehe Oxyde | 550 |
| Zink | | 550 |
| Zinn | | 560 |
| Schwefeleisen | | 660*) |

*) Dabei geringe SO₂-Entwicklung.

mit Pentan und Benzol als Zündstoff aufgenommen und dadurch einen Einblick in den Mechanismus der Katalyse sowie in die Spezifität der einzelnen Kontakte bezüglich Stärke und Art ihrer Wirkung bekommen.

In den Kurvenbildern sind die Selbstzündungskurven von Pentan (Abb. 1) und Benzol (Abb. 2) mit Uranoxyd, Kobaltoxyd, Calciumoxyd, Vanadinpentoxyd, Zinnsäure sowie Palladiumasbest als Kontaktstoff einander gegenübergestellt.

Kontaktwirkung bei Pentan.

Vergleicht man bei den Kurven (Abb. 1) den Einfluß der Kontakte auf die Selbstzündungseigenschaften des Pentans, so zeigt sich eine für die einzelnen Stoffe in ihrem Ausmaß verschiedene, in ihrer Art jedoch gleiche und typische Kontaktwirkung in zweierlei Richtung. Bei reichlicher Sauerstoffzufuhr wirkt der Kontakt beschleunigend, d. h. der Selbstzündungspunkt wird herabgesetzt, und die ohne Kontakt für Pentan beobachtete Zündlücke⁵⁾ fällt fort. Führt man jedoch nur so große Sauerstoffmengen zu, wie sie ohne Kontakt bereits zur Selbstzündung ausreichen, so tritt in der Regel keine Zündung ein, d. h. die reaktionsbeschleunigende Kontaktwirkung bleibt nicht nur aus, sondern schlägt unter den gleichen Bedingungen in eine reaktionshemmende um, wie wir sie bei den „Antiklopff-

¹⁾ Ztschr. angew. Chem. 45, 593 [1932].

²⁾ Glückauf, Jahrgang 1932, S. 965 ff.

³⁾ Selbstzündungspunkt: niedrigster Temperaturpunkt, bei dem in reichlichem Sauerstoffstrom noch eine Zündung eintritt; oberer Zündwert: niedrigster Temperaturpunkt, bei dem bei abgestellter Sauerstoffzufuhr (d. h. also in Luft) noch eine Zündung eintritt.

⁴⁾ loc. cit.

⁵⁾ Jentzsch, Flüssige Brennstoffe, VDI-Verlag 1926, S. 88.

mitteln“ kennen. Je nach der Sauerstoffmenge wirkt der Kontakt also als „Peitsche“ oder als „Bremse“. Diese Beobachtung liefert gleichzeitig einen wertvollen Beitrag zur Kenntnis der Wirkungsweise metallorganischer Anti-

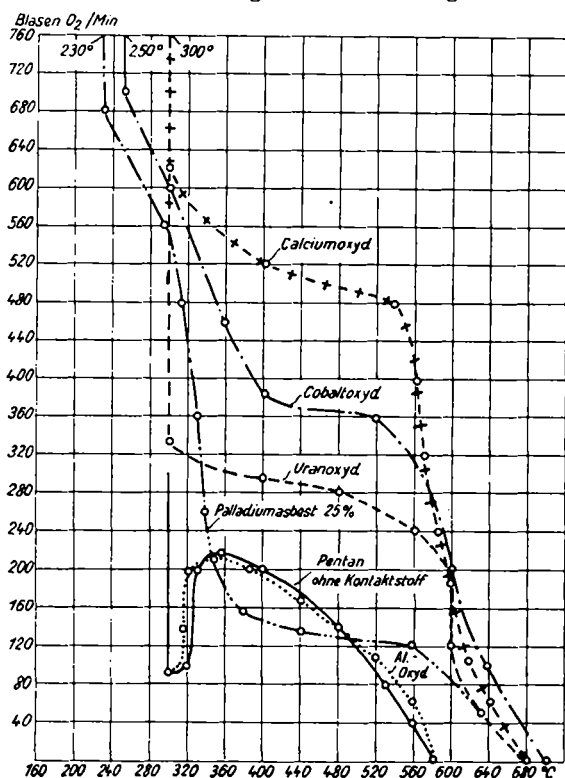


Abb. 1.

Selbstzündungskurven von Pentan mit und ohne Kontaktstoffen.

klopfmittel, die bei Temperaturen, wie sie während des Kompressionshubes in den Maschinen auftreten, in außerordentlich fein verteilte freie Metallatome und einen organischen Bestandteil zerfallen, und deren klopfmindernde Wirkung erfahrungsgemäß⁶⁾ der Metallkomponente zukommt. Die von Egerton⁷⁾ vertretene Ansicht, daß die Metallteilchen durch Energieaufnahme den Ablauf der Reaktionsketten verhindern, wird durch obige Ergebnisse, die den großen Einfluß der Sauerstoffkonzentration auf die energetischen Verhältnisse zeigen, gestützt. Welche Rolle das Metall außerdem noch bei der Bildung und Umsetzung der anschließenden, nach Berl⁶⁾ wahrscheinlich über Peroxyde verlaufenden Einzelreaktionen, spielt, sei dahingestellt.

Die „bremsende“ Wirkung des Kontaktes in Abhängigkeit von der geringen Sauerstoffdichte der Umgebung zeigt sich auch beim oberen Zündwert, der wesentlich heraufgesetzt wird und erst in einem Temperaturbereich liegt, in dem die Wirksamkeit des Kontaktes scheinbar bereits weitgehend ausgeschaltet ist.

Kontaktwirkung bei Benzol.

Ähnliche Beobachtungen wie bei Pentan ergeben sich auch aus den Selbstzündungskurven, die man für Benzol (Abb. 2) mit und ohne Kontaktstoff erhält. Abgesehen von der spezifischen Wirksamkeit der einzelnen Kontaktstoffe untereinander ist ihr reaktionsbeschleunigender Einfluß dadurch erkennbar, daß sich der Szp. des Benzols außerordentlich erniedrigt (auf 160° mit 50%igem Palladiumasbest gegenüber 690° ohne Kontakt), und daß man für Benzol Zündkurven erhält, die denjenigen der normalen Aliphaten

ohne Kontaktstoff gleichen. Die für solche Verbindungen typische Zündlücke tritt ebenfalls auf. Durch die Kontaktwirkung wird also die sonst beobachtete, auf der chemischen Konstitution des Benzolmoleküls beruhende Stabilität bei Selbstzündungsvorgängen gebrochen, allerdings ist hierfür eine außerordentlich große Sauerstoffzufuhr Bedingung. Der obere Zündwert des Benzols wird erwartungsgemäß durch keinen der verwendeten Kontakte verändert.

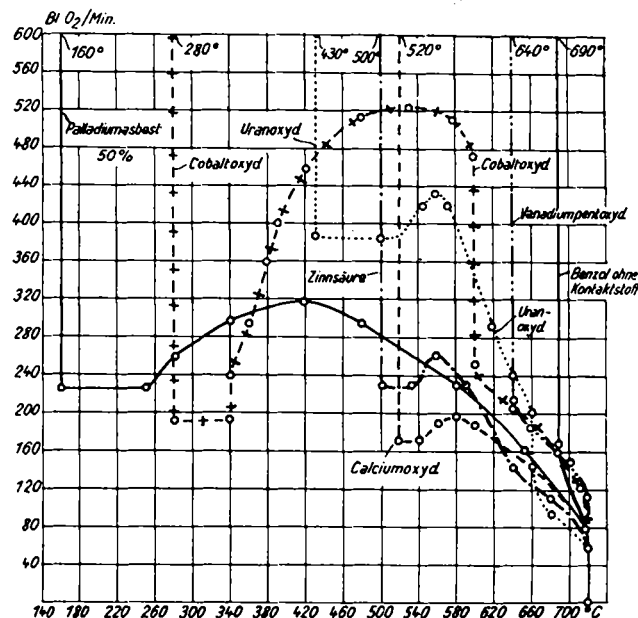


Abb. 2.

Selbstzündungskurven von Benzol mit und ohne Kontaktstoffen.

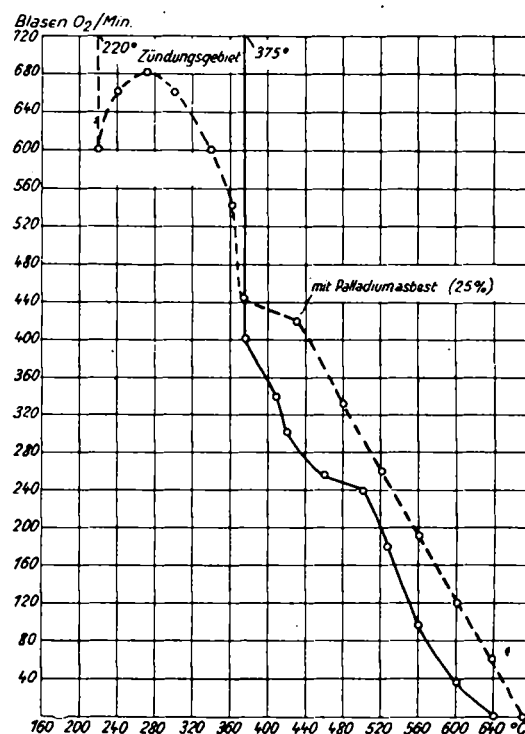


Abb. 3. Selbstzündungskurven von Hexamethylbenzol mit und ohne Palladiumasbest (25%).

Um zu zeigen, daß der Kontakt auch auf gewisse Aromaten bei ungenügender Sauerstoffzufuhr reaktionshemmend wirken kann, haben wir in Abb. 3 Selbstzündungskurven von Hexamethylbenzol mit und ohne Kontakt einander gegenübergestellt, da dieser Kohlenwasserstoff, im Gegensatz zu Benzol, ohne Kontakt bereits bei Temperaturen im Wirkungsbereich der Kontakte zündet. Ein Vergleich der Kurven zeigt ein-

⁶⁾ Berl, Ztschr. physikal. Chem. 139, 453 [1928]; 145, 161 [1929]; 148, 30, 261 [1930].

⁷⁾ Egerton, Ber. d. Rumian Chimie physique, Paris, 1928.

wandfrei, daß der Kontakt „bremsend“ wirkt, denn bei Temperaturen und Sauerstoffkonzentrationen, bei denen man ohne Kontakt bereits Zündung erhält, bleibt sie mit Kontakt aus. Interessant ist, daß sich auch bei Anwesenheit des Kontaktes der früher beobachtete Einfluß⁶⁾ der hohen Belastung mit aliphatischen Seitenketten in der Zündkurve bemerkbar macht.

Kontakt-Mechanismus.

Versucht man trotz der Schwierigkeit, Reaktionsvorgänge bei Gegenwart von Katalysatoren zu klassifizieren, die Ergebnisse des obigen Versuchsmaterials zusammenzufassen, so zeigt sich, daß die früher für die Zündung ohne Kontakt gemachten Feststellungen ebenfalls bei Anwesenheit von Kontakten Gültigkeit haben: Die Selbstzündung ist abhängig von der Sauerstoffdichte der Umgebung, und zu jeder Selbstzündungstemperatur gehört eine Mindestsauerstoffdichte.

Auch die Beobachtung, daß mit steigender Temperatur geringere Sauerstoffmengen zur Selbstzündung erforderlich sind und mit wachsender Sauerstoffdichte verringerte Temperaturen, bleibt als eine Gesetzmäßigkeit bestehen, die naturgemäß innerhalb der Temperaturintervalle der Zündlücke ausfällt.

Die Beobachtung, daß der Katalysator in der Regel nach Zugabe des Zündstoffes bei ungenügender Sauerstoffzufuhr schwach aufzuglühen beginnt, die Zündung aber erst eintritt, wenn man durch Steigerung der Sauerstoffzufuhr auch die Glüherscheinungen am Katalysator steigert, läßt die Annahme zu, daß sich an der Oberfläche des Kontaktes zunächst aus ihrem molekularen Zusammenhang gelöste, aktivierte, energiereiche Bestandteile als Ausgangspunkt für nachfolgende Kettenreaktionen bilden. Diese erhitzen den Katalysator bis zum Aufglühen, Vorgänge, die zu ihrer Aktivierung und zu ihrem Ablauf für jede Temperatur verschiedene Sauerstoffmengen gebrauchen. Durch diese Temperatursteigerung wird dann nicht nur die Umsetzungsgeschwindigkeit der Einzelreaktionen entsprechend beschleunigt, sondern schließlich die zur Entzündung des entstandenen zündfähigen Gemisches erforderliche Temperaturhöhe an der Kontaktoberfläche geschaffen. Die Selbstzündung tritt infolgedessen bei einer Temperatur ein, die mit der des Zündtiegels in keinerlei Zusammenhang zu stehen scheint, ja es hat bei sehr reaktionsfähigen Katalysatoren manchmal den Anschein, daß der hochglühende Kontaktstoff geradezu als Initialzündler wirkt und die Grenze zwischen Selbst- und Fremdzündung völlig verwischt. Die im Zündtiegel für die Selbstentzündung gemessene Temperatur gibt also nur die Temperaturhöhe an, die erforderlich ist, um die eben beschriebene Kontaktwirkung einzuleiten, die Reaktionsfähigkeit und Wirkungsart des Katalysators hingegen findet besser ihren Ausdruck in dem erforderlichen Sauerstoffbedarf. Der reaktionshemmende Mechanismus der Kontaktwirkung ist bereits weiter oben erläutert.

Diese Vorgänge sind für Aliphaten und Aromaten die gleichen. Naturgemäß drückt sich jedoch auch die verschiedene große Zerfallgeschwindigkeit in dem erforderlichen Sauerstoffbedarf aus, da die jeweils zur Erreichung eines zündfähigen Gemisches erforderliche Sauerstoffmenge von der Bildungsgeschwindigkeit der Spaltprodukte abhängig ist und infolgedessen bei dem am Kontakt rapid zerfallenden Pentan größer sein muß als bei dem stabileren Benzol.

Wie bei vielen katalytischen Wirkungen ist auch für die Selbstzündungsvorgänge die Oberflächenwirkung

des Kontaktes von außerordentlicher Bedeutung. Einen Beweis bildet der große Unterschied in der Wirkung des Vanadinpentoxyds, das bei unseren Versuchen ohne Kontaktträger nur wenig wirkungsvoll war, während *Broche* und Mitarbeiter⁹⁾ durch Verwendung eines Kontaktträgers mit hochentwickelter Oberfläche damit ausgezeichnete Resultate erhielten.

Dieselbe Ursache dürfte auch das Ausbleiben stärkerer Kontaktwirkung bei einer Versuchsreihe haben, bei der wir die Zündteller aus dem Kontaktmaterial anfertigten. Die Selbstzündungskurven in Kurve 4 zeigen, daß die Verwendung von

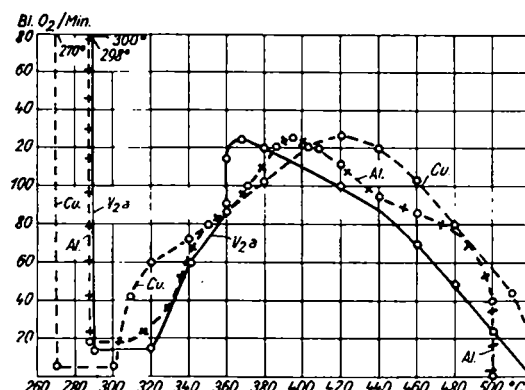


Abb. 4. Selbstzündungskurven von Pentan mit verschiedenen Vergasungstellern.

Zündtellern aus Kupfer, Aluminium oder Gußeisen an Stelle von V₂A-Stahltellern fast ohne Einfluß auf die Zündungsvorgänge ist.

Das Ausmaß der Wirkung eines Kontaktstoffes ist selbst für Zündstoffe derselben Körperklasse spezifisch, was Tabelle 2 über die Kontaktwirkung von Palladiumasbest auf verschiedene Alkohole und Naphthene zeigt.

Tabelle 2.

Selbstzündungspunkte von Alkoholen und Naphthenen ohne Kontakt und mit 25% Palladiumasbest als Kontakt.

| Stoff | Selbstzündungspunkt °C | |
|-----------------------|------------------------|-------------|
| | ohne Kontakt | mit Kontakt |
| Methylalkohol | 500 | 50 |
| Äthylalkohol | 375 | 200 |
| Propylalkohol | 370 | 200 |
| Cyklohexan | 325 | 240 |
| Cyklohexen | 325 | 210 |
| Cyklohexanol | 350 | 290 |
| Cyklohexanon | 550 | 250 |

Um zu beweisen, daß die Versuchsanordnung die Ergebnisse nicht beeinflußt hat, haben wir eine Zündkurve mit fein verteiltem Aluminiumoxyd aufgenommen (Abb. 1). Die Kurve zeigt denselben Verlauf wie eine solche ohne Kontakt und bestätigt somit, daß bei den wirksamen Stoffen eine einwandfreie Kontaktwirkung vorliegt.

Die Temperaturunterschiede zwischen den von uns und anderen Beobachtern gefundenen Selbstzündungspunkten müssen auf die verschiedenen Versuchsbedingungen und Apparaturen zurückgeführt werden.

Die obigen und bisherigen Versuchsergebnisse lehren, daß zum Studium der Selbstzündungsvorgänge jedoch nur ein Gerät, wie wir es verwenden, geeignet ist, bei dem man neben der Temperatur auch die Sauerstoffkonzentration messend variieren kann, und das es ermöglicht, nach jeder Stoffeingabe die Zündkammer von Rückständen und Verbrennungsgasen zu reinigen. Auch die Anordnung mehrerer Zündkammern ist unerlässlich, da dadurch, wie im vorliegenden Falle, auch die Wirkung der Kontaktstoffe auf die entstandenen Gase und Dämpfe beobachtbar wird.

⁶⁾ Ztschr. angew. Chem. 45, 595 [1932].

⁹⁾ loc. cit.

Experimenteller Teil.

Die Kurven wurden in der üblichen, früher beschriebenen Weise¹⁰⁾ aufgenommen. Der Kontaktstoff wurde in feiner Verteilung auf den Zündtellern aus V₁A-Stahl untergebracht, zwischen den einzelnen Stoffeingaben wurden durch mehrfaches Anheben der Zündteller die Abgase aus den Kammern entfernt. Die Möglichkeit, daß durch die Tiegelwendung die Kontaktwirkung beeinflußt werden konnte, mußte bei dieser Arbeitsweise unberücksichtigt bleiben. Da wir beobachtet hatten, daß die frisch bereiteten Kontakte teilweise bei den ersten Zündungen wirksamer waren (der Szp. von Benzol liegt bei Verwendung von frisch bereitetem Kobaltoxyd bei 190°, später bei 250°), haben wir vor Aufnahme der Kurven den Kontakt durch längeren Gebrauch auf gleichmäßige Wirksamkeit eingestellt.

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß bei Selbstentzündungen die verschiedensten Stoffe katalytische Wirkungen von weit-

¹⁰⁾ Ztschr. angew. Chem. 45, 597 [1932].

tragender Bedeutung ausüben können, und daß bei der Aufklärung der Ursachen von Selbstentzündung neben den bereits bekannten Faktoren auch Kontaktwirkungen einbezogen werden müssen.

Zusammenfassung.

1. Der katalytische Einfluß einer größeren Zahl von Stoffen auf Selbstzündungsvorgänge wurde geprüft und durch Selbstzündungskurven die Art und Stärke der Kontaktwirkung veranschaulicht.
2. Auch bei Gegenwart von Kontaktstoffen ist die Selbstzündung in erster Linie abhängig von der Temperatur, der Sauerstoffdichte der Umgebung und der chemischen Konstitution des Zündstoffes.
3. Der Bedarf an Zündungssauerstoff wurde ermittelt und dabei eine die Selbstzündung beschleunigende oder hemmende Wirkung der Kontaktstoffe festgestellt.

[A. 95.]

Schmelzbereiche von Siliciumdioxid-Glasoxyd-Systemen und einige daraus zu ziehende Schlüsse.

Von Dipl.-Ing. M. HOLLENWEGER, Bonn, und Dr.-Ing. H. RUMPELT, Dresden.

(Eingeg. 27. Juni 1933.)

(Institut für Kolloidchemie der Techn. Hochschule Dresden.)

Es ist allgemein bekannt, daß man durch Zusatz verschiedener Fremdstoffe, z. B. Kreide, Feldspat, Kaolin, Mennige, Soda, Borax usw., zu Quarz den Schmelzpunkt der so entstandenen Systeme beeinflussen kann. Derselbe liegt um so tiefer, je mehr Anteile Fremdstoffe in dem Gemenge vorhanden sind. In dieser Hinsicht wirksam sind in den einzelnen Fremdstoffen bestimmte Molekülgruppen, so beim Feldspat das K₂O, das Al₂O₃, bei der Mennige das PbO. Man kann aber nicht durch Zusatz großer Mengen solcher Fremdstoffe zu Quarz den Schmelzpunkt des Gemisches beliebig weit herabdrücken. Die Verhältnisse liegen hier analog der Lösung eines Salzes, z. B. in Wasser. Im Falle der Quarz-Fremdstoff-Gemenge muß man den Quarz als Lösungsmittel ansehen, die Fremdmoleküle sind die zu lösenden Stoffe. Da nun Quarz von einem Stoff nicht genügend lösen kann, müssen, zwecks weiterer Herabsetzung der Schmelztemperatur, noch andere Fremdmoleküle zugesetzt werden. Aus diesem Grunde sind die Segerkegel nicht nur aus Quarz und einem Fremdstoff aufgebaut, sondern die höheren Nummern enthalten deren drei, die niedrigschmelzenden bis zu sechs.

Der eine von uns¹⁾, von dem auch die meisten theoretischen Überlegungen stammen, hat in zwei Kurvenbildern die Abhängigkeit der Schmelztemperaturen von Quarz-Fremdstoff-Gemischen von der Anzahl der beigemengten Fremdmoleküle aufgetragen. Als Beispiel sind die Segerkegel gewählt worden, bei denen obengenannte Bedingung, daß von sämtlichen Fremdmolekülen alles im Quarz in Lösung gehen muß, eingehalten ist. In Abb. 1 sind als Abszisse die Prozente Fremdmoleküle, als Ordinate die Schmelztemperaturen aufgetragen. Die Kurve stellt eine Hyperbel dar. In Abb. 2 ist als Abszisse das Verhältnis Mole Kieselsäure/Mole Fremdmoleküle gewählt, während die Ordinate wiederum die Temperaturachse ist. Es ergibt sich uns eine Gerade.

Auf Grund dieser aus der Erfahrung abgeleiteten Abhängigkeit der mittleren Schmelztemperatur der Segerkegel von dem Molenverhältnis, wobei im Zähler des Molenbruches die Anzahl der Kieselsäuremoleküle K und im Nenner die Summe sämtlicher anderer in der Mischung anwesenden Moleküle fremder Stoffe F stehen, ergibt sich folgende Beziehung:

$$\frac{K}{F} = C_1 \cdot (T - T_0)$$

Dabei bedeutet C₁ eine Konstante, T die absolute Schmelztemperatur und T₀ die Temperatur, bei der die Gerade die Ordinateachse schneidet. Multiplizieren wir

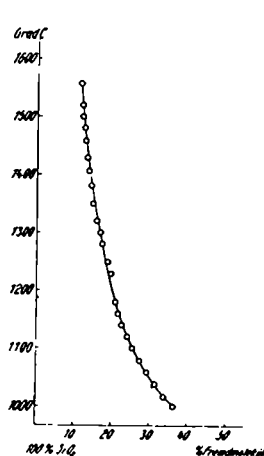


Abb. 1.

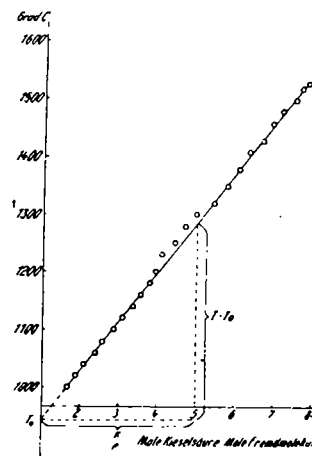


Abb. 2.

beide Seiten der Gleichung mit dem Molekulargewicht der Kieselsäure und dividieren ebenfalls beide Seiten mit dem spezifischen Gewicht der Kieselsäure, so wird die Dimension der linken Seite der Gleichung:

$$\frac{\text{Mole Kieselsäure}}{\text{Fremdmole}} \cdot \frac{\text{Gewicht}}{\text{Mole Kieselsäure}} \cdot \frac{\text{Volumen}}{\text{Gewicht}} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Fremdmole}}$$

Das ist aber nichts anderes als das spezifische Volumen der Fremdmole v_f . Das in die Gleichung eingesetzt, gibt:

$$1) \quad v_f = C_2(T - T_0)$$

Da der Druck im vorliegenden Fall als konstant angesehen werden kann, liefert die abgeleitete Gleichung demnach eine Beziehung zwischen dem spezifischen Volumen der Fremdmole und der Schmelztemperatur bei konstantem Druck, sie ist also eine Zustandsgleichung der Schmelzlinie bei konstantem Druck. Die Gleichung gilt nur unter der Voraussetzung, daß alle vorhandenen Stoffmengen in der Kieselsäure in Lösung gehen.

Die allgemeine Zustandsgleichung der idealen Gase lautet:

$$p \cdot v = R \cdot T$$

p ist wieder der Druck, v das spezifische Volumen, R die Gas-konstante, T die absolute Temperatur.

Diese Gleichung können wir für konstanten Druck auch schreiben:

$$v = C_3(T - T_2),$$

¹⁾ M. Hollenweger.