

Es konnte durch weitere Versuche die Auflösung einer Brennfläche in einzelne Flammenfäden noch deutlicher gezeigt werden. Durch Anwendung eines Frittbrenners in Gestalt einer normalen Glasfrittnutsche (Fig. 2) wurden ohne Schwierigkeit bei denselben Gemischen wie oben getrennte kleine Brennflächen erhalten, die regelmäßig über den ganzen Querschnitt verteilt waren und sich auch leicht von oben aufnehmen ließen (Fig. 3). Zahl und mittlere Querschnittsgröße dieser Brennflächen in Abhängigkeit von dem Wasserstoffgehalt mit CO_2 als Inertgas zeigt Fig. 4. Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit nimmt die Zahl der Brennflächen zu, wie die durch Abzählungen an H_2 - O_2 -Gemischen erhaltenen und in Fig. 5 gezeigten Ergebnisse erkennen lassen. Die Abhängigkeit von Zahl und Größe der Brennflächen von den Versuchsbedingungen werden durch Betrachtung von Verbrennungsgeschwindigkeit, Wasserstoffdiffusion und Wärmeabgabe an die Fritte verständlich.

Die Auflösung der Brennfläche ist ein sichtlicher Beweis für die grundsätzliche Richtigkeit der Vorstellungen von CLUSIUS und Mitarbeitern. Da jedoch die Versuchsbedingungen auf dem Frittbrenner für die Verbrennung ganz andere sind als für eine Rohrflamme, für welche die Auflösung nur bei aufsteigender Flamme eintritt, sind diese Versuche nicht als sicherer Beweis für die inhomogene Struktur der entsprechenden Flammen im Rohr zu werten.

Benutzt man als Brenngas Methan-Wasserstoff-Gemische, so überlagert sich der normalen Methanverbrennung die Wasserstoffdiffusion und gibt Anlaß zu einer Flammenstörung dergestalt, daß der Brennegel auf dem Düsenbrenner aus einzelnen von der Basis zur Kegelspitze sich hinziehenden Bergen und Tälern besteht, die der Brennfläche eine Art Wellblechstruktur geben.

Straßburg/Elsaß, den 17. September 1943.

HANS BEHRENS.

¹⁾ K. CLUSIUS, W. KÖLSCH u. L. WALDMANN, Z. physik. Chem., Abt. A 189, 131 (1941).

²⁾ H. MACHE u. HEBRA, S.-B. Akad. Wiss. Wien, Abt. II a 150, 157 (1941).

Gestalt von Düsenflammen mit Brennstoffüberschuß.

Die am Ende der vorstehenden Notiz beschriebene Flammenstörung wird regelmäßig erhalten mit Düsenflammen von höheren Kohlenwasserstoffen wie Benzol, Cyclohexan, Isooktan, n-Heptan sowie auch von Aceton und Äther unter Anwendung eines Brennstoffüberschusses¹⁾. Bei stärkerer Überfettung tritt ein aus Ruß bestehender Leuchtstrahl aus der Kegelspitze aus. Fig. 1 und 2 zeigen Aufnahmen am Benzol, bei welchem diese Erscheinungen am klarsten hervortreten und dessen Flamme daher als typisch betrachtet werden kann. Den Gegentyp bildet die Flamme des Acetylen, bei welcher weder Flammenstörung noch ein Leuchtstrahl aus der Kegelspitze auftreten. Brennstoffüberschuß gibt sich in diesem Falle durch ein aus der gesamten Kegelfläche austretendes Leuchten zu erkennen; charakteristisch ist ferner ein oberhalb der Kegelspitze angelegter strahlartig ausgebildeter Dunkelraum sowie eine vom Brenneraum ausgehende nach oben hin offene Leuchtschale (Fig. 3). Eine Überlagerung bei-

der Typen liegt vor bei der Äthan- und Propan-Sauerstoff-Flamme (Fig. 4).

Der Befund, daß zumeist der durch thermische Spaltung überschüssiger Brennstoffmoleküle entstehende Ruß nur aus der Kegelspitze als feiner Strahl austritt, ist auf den starken Thermodiffusions-effekt zurückzuführen, dem die hochmolekularen Rußteilchen in der Brennzona mit einem Temperaturgradienten von zirka $100000^\circ/\text{cm}$ unterliegen. Die Rußteilchen bewegen sich an das kalte Ende der Brennzona, d. h. sie sammeln sich an der inneren Seite des Brennegels und wandern stetig zur Spitze hin, um schließlich dort als leuchtender Strahl auszutreten. Dieser Vorgang läuft immer dann ab, wenn die Verweilzeit innerhalb der Brennzona für eine Crackung zu Ruß ausreichend ist. Für die bei hohen Temperaturen relativ stabilen Acetylenmoleküle reicht die Verweilzeit zur Crackung nicht aus, so daß die Crackung erst außerhalb der Brennzona in einem Gebiet stattfindet, wo zwar noch hohe Temperatur, aber kein erheblicher Temperaturgradient mehr vorhanden ist. Die überschüssigen Acetylenmoleküle durchschreiten die Brennegelfläche und bilden erst in der Außenzone leuchtende Rußteilchen.

Aus dem Erscheinungsbild der überfetteten Flammen kann auf die Natur der Crackprodukte geschlossen werden. Die Sauerstoffflammen des Methans und Äthylens zeigen das Bild des Acetylen, die Brenngase werden also innerhalb der Brennzona nur bis zum Acetylen gespalten, Äthan und Propan sowohl zum Acetylen, als auch zum Teil zu Ruß. Soweit in der Literatur direkte Crackuntersuchungen bei hohen Temperaturen beschrieben sind, stimmen diese bestens mit diesen Ergebnissen überein.

Aus vergleichenden Untersuchungen an verschiedenen Brenngasgemischen ergibt sich, daß die Flammenstörung immer dann auftritt, wenn gleichzeitig oder bei weiterer Überfettung Rußteilchen aus der Kegelspitze austreten, so daß ein ursächlicher Zusammenhang beider Erscheinungen nahegelegt wird. An einer teilweise verkehrt brennenden, gestörten Propan-Sauerstoff-Flamme, die nach dem Vorschlag von MACHE²⁾ durch das Hineinbringen eines Drahtes in die Achse eines normalen Brennrohres erzeugt wurde, konnte unmittelbar gesehen werden, daß die Rußteilchen aus den am oberen Brennegelrand endenden einzelnen Wellenbergen in getrennten Strahlen austreten, so daß die Wellenberge gewissermaßen als Kanäle für die nach oben wandernden Rußteilchen dienen (Fig. 5).

Durch die am Schluß der vorhergehenden Notiz beschriebene Beobachtung, daß wasserstoffhaltige Methangemische die Flammenstörung in normaler Form aufweisen, liegt die Vermutung nahe, daß die Flammenstörungen an überfetteten Flammen durch den gleichzeitig mit dem Ruß sich bildenden Wasserstoff verursacht werden. Ferner ist die aus Beobachtungen an der oberen Zündgrenze abgeleitete Tatsache zu berücksichtigen, daß in ähnlicher Weise, wie die große Diffusionsfähigkeit des Wasserstoffs im mageren Bereich, die große Beweglichkeit des Sauerstoffs im fetten Bereich sich auswirkt. Da die Wellentäler Orte höherer Verbrennungsgeschwindigkeit sind, ist anzunehmen, daß zu diesen Wasserstoff und Sauerstoff diffundieren und Anlaß zu einer relativ hohen Verbrennungstemperatur geben; da nun die infolge einer lokal geringeren Verbrennungsgeschwindigkeit nach außen sich abhebenden Wellen-

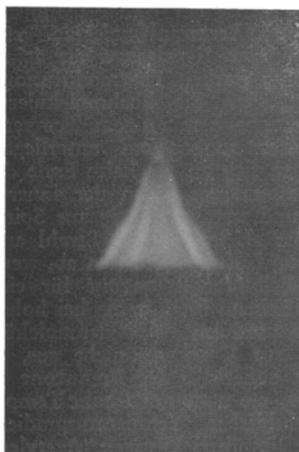


Fig. 1. Benzolluft, wenig überfettet.

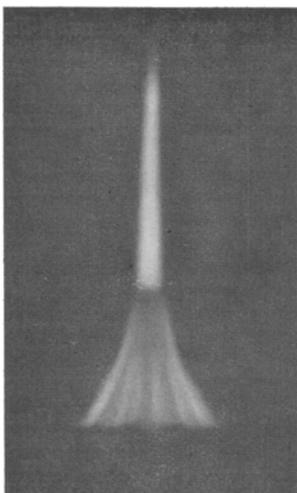


Fig. 2. Benzolluft, stark überfettet.

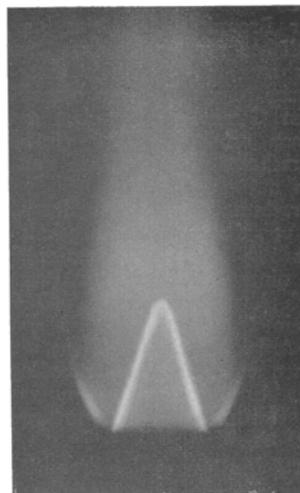
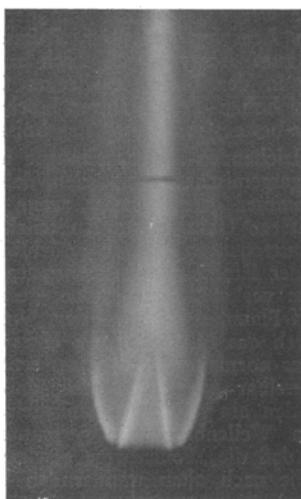
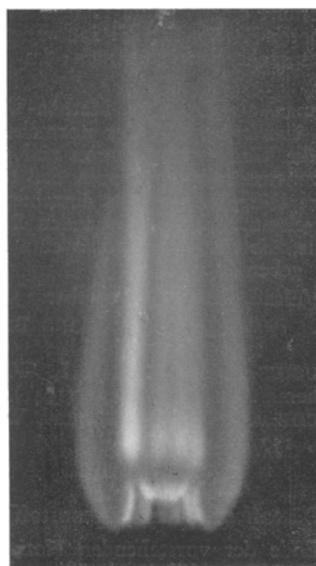


Fig. 3. Acetylenluft.

Fig. 4. Äthan + O₂.Fig. 5. Propan + O₂.

berge Orte geringerer Verbrennungsgeschwindigkeit und niedriger Verbrennungstemperatur sind, wandern die Rußteilchen wiederum infolge Thermodiffusion an diese Orte, womit den Rußteilchen bezüglich der Flammenstörung nur eine sekundäre Rolle zukäme. Hiermit steht im Einklang, daß die Flammenstörung bereits bei einem Brennstoffüberschuß zu beobachten ist, bei dem noch keine Rußbildung eintritt, wohl aber gemäß dem Wassergasgleichgewicht neben Kohlenoxyd Wasserstoff als unvollständiges Verbrennungsprodukt vorhanden ist.

Aus der großen Diffusionsfähigkeit des Wasserstoffs und der hohen Thermodiffusionswirkung auf Rußteilchen lassen sich Aussehen und Gestalt von

Brennerflammen unter einheitlichen Gesichtspunkten verstehen.

Herrn Prof. Dr. W. JOST habe ich für die Förderung meiner Arbeiten durch anregende Aussprachen zu danken.

Straßburg/Elsaß, den 17. September 1943.

HANS BEHRENS.

¹⁾ Das Auftreten einer Flammenstörung in speziellen Fällen bei Vermeidung des Luftzutritts zu einer normalen Brennerflamme ist bereits beschrieben worden von SMITH u. PICKERING, Ind. Engng. Chem., analyt. Edit. 20, 1012 (1928).

²⁾ H. MACHE, S.-B. Akad. Wiss. Wien, Abt. II a 150, 109 (1941).