

Die Grubenlampe.

Von

Prof. Dr. Heinrich Mache.

Vortrag, gehalten den 18. Januar 1911.

Mit 3 Figuren im Texte.

Es sind dem Menschen feindliche Gewalten, von denen wir heute sprechen wollen; unfreundlich, von abergläubischen Vorstellungen umspinnen, traten sie zuerst dem Menschen entgegen.

Sie haben alle vom Irrlicht gehört, doch hat kaum jemand von Ihnen eines gesehen. So hat die Seltenheit der Erscheinung eine Zeitlang dazu geführt, ihre Existenz überhaupt anzuzweifeln, bis einer der exaktesten Beobachter, der Astronom Bessel, ihr Vorhandensein bestätigte. Es ist also wahr, daß auf Sümpfen, Mooren, vielleicht auch auf Friedhöfen, bisweilen kleine blaue Flämmchen erscheinen, die der geringste Luftzug erlöscht, die sich dann aber bald wieder von selbst entzünden und, indem sich dieses Spiel bald da, bald dort wiederholt, den Anschein des unbeständigen Wanderns, Irrens der Flamme vortäuschen.

Das Entstehen des brennbaren Gases ist an diesen Orten leicht aufzuklären. Wo immer organische Substanzen, also z. B. Pflanzen unter Luftabschluß und unter Zutritt von Wasser vermodern, wie dies in den Mooren, den Bildungsstätten des Torfes, der Fall ist, bildet sich ein brennbares Gas, das sogenannte Sumpfgas oder

Methan, wie es der Chemiker nennt. Indem dieses Gas sich mit Luft vermischt, erhält es den zur Verbrennung nötigen Sauerstoff. Die Selbstentzündung des Gasgemisches beruht vermutlich auf einer geringen Beimengung von Phosphorwasserstoff, eines Gases, das bei Berührung mit Luft auch bei normaler Temperatur von selbst entflammt. Da Sumpfgas an sehr vielen Orten ausströmt, das Irrlicht aber eine sehr seltene Erscheinung ist, kann man schließen, daß nur in seltenen Fällen der Gehalt des Sumpfgases an selbstentzündlichem Phosphorwasserstoff groß genug ist, um die Erscheinung auszulösen. Dieselbe Sumpfgasentwicklung, wie sie sich heute vor unseren Augen in den Torfmooren abspielt, trat seinerzeit in den ungeheuren Sümpfen auf, in welchen vor Millionen von Jahren die üppige Pflanzenwelt der Kohlenzeit versank und vermoderte. Die Überwerfungen und Überschiebungen, welche seitdem die Erdkruste erfuhr, haben bewirkt, daß die damals gebildeten Torfe nun unter der Erde liegen, und der Druck der aufliegenden Schichten und die fortschreitende Zersetzung hat diese Torfe in Kohle verwandelt. Aber wie seinerzeit im Licht des Tages vollzog und vollzieht sich unter der Erde in den Kohlenflözen als Begleiterscheinung der stets fortschreitenden Verkohlung die Entwicklung von Sumpfgas, allerdings mit dem wesentlichen Unterschied, daß seinerzeit das Gas frei in die Atmosphäre entweichen konnte, jetzt aber in der Kohle und ihrer unmittelbaren Umgebung dauernd aufgespeichert bleibt. Bedenkt man die ungeheuren Zeiträume, die seit der Verschüttung der

jetzigen Kohlenlager verfließen sind, so kann es nicht überraschen, daß die in der Kohle eingeschlossenen Mengen von Sumpfgas sehr große sind. Man hat gemessen, daß ein Kubikmeter Kohle bis zu 40 Kubikmeter Sumpfgas enthält. Da dieses Gas größtenteils in den kleinen Spalten und Poren der Kohle enthalten sein muß, so muß es dort stark verdichtet sein, also unter einem hohen Druck stehen, der mit 100 Atmosphären gewiß nicht zu hoch geschätzt ist.

Werden nun die Flöze durch den Bergbau aufgeschlossen, so entweicht das aufgespeicherte, bisher zurückgehaltene Sumpfgas in die Grubenluft und bildet mit ihr ein brennbares, explosives Gasgemenge, das gefürchtete schlagende Wetter.

Dieses Entweichen des Sumpfgases aus der Kohle in die Grubenluft kann auf verschiedene Weise geschehen:

Ich habe hier eine unglasierte Tonzelle, wie sie in den galvanischen Elementen verwendet werden, und verbinde den Innenraum dieser Zelle durch einen Schlauch mit einem Wassermanometer. Halte ich nun die Tonzelle in ein größeres Glasgefäß, in das ich aus der Gasleitung Leuchtgas einströmen lasse, so sehen Sie sofort an der Bewegung der Manometerflüssigkeit, daß das Leuchtgas durch die feinen Poren des gebrannten Tons hindurch in die Luft eindringt, welche sich im Innern der Tonzelle befindet. Man bezeichnet diesen Prozeß als Diffusion.

Nun unser Leuchtgas wird aus der Kohle durch künstliche Beschleunigung des in der Erde selbsttätig vor

sich gehenden Verkohlungsprozesses gewonnen und besteht etwa zur Hälfte aus Sumpfgas. So wie das Leuchtgas durch die Poren des Tons in die Luft der Zelle eindringt, so dringt auch das in der Kohle enthaltene Sumpfgas vermöge Diffusion durch die Poren der Kohle in die Luft der Grube. Es nimmt also die Luft, welche die im Betrieb stehende Grube ventiliert, beständig Sumpfgas mit sich, ja die Mengen dieses brennbaren Gases, welche mit der Luft ungenützt entweichen, sind für die gasreichsten Gruben, wie wir sie in Karwin und in Teilen des Ostrauer Reviers besitzen, so groß, daß ihr Wert, woferne sie gesondert zu erhalten wären, den der geförderten Kohle nicht unbeträchtlich überträfe.

Außer durch Diffusion dringt das Sumpfgas bisweilen auch in Form plötzlicher Gasausbrüche in die Grubenluft. Ist in der Kohle oder in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft ein Hohlraum vorhanden, so sammeln sich dort die brennbaren Gase und da, wie wir gehört haben, der Gasdruck in der Kohle sehr bedeutend ist, so können sie unter einem bedeutenden Druck stehen, auf viele Atmosphären komprimiert sein. Wird nun der Hohlraum durch einen Sprengschuß oder durch einen Schlag mit der Spitzhaue geöffnet, so entweicht das aufgespeicherte, verdichtete Gas mit großer Gewalt, es bildet sich ein sogenannter „Bläser“, der angezündet eine riesige, oft meterlange Flamme bildet. Ist der Hohlraum groß, so ist der Gasvorrat oft erst nach Monaten erschöpft. Auch geschieht es manchmal, zum Glücke selten, daß ein solcher Hohlraum sich durch den in ihm herrschenden

Gasdruck von selbst öffnet. Die trennende Kohlenwand wird weggerissen, pulverisiert und enorme Mengen von Sumpfgas und Kohlenstaub dringen plötzlich in die Grubenluft ein.

Es sei hier nur nebenbei erwähnt, daß die Anwesenheit von Kohlenstaub in der Grubenluft an sich bereits eine Explosionsgefahr bedeutet. Sie haben gewiß schon von den Mehlexplosionen gehört, die bisweilen in Mühlen eintreten. Der in der Luft schwebende Mehlstaub entzündet sich an einer Flamme und es tritt eine Explosion ein, die mitunter das ganze Gebäude zerstört. So kann sich auch der in der Grubenluft schwebende, fein verteilte Kohlenstaub unter den Erscheinungen einer heftigen Explosion entzünden, selbst in Abwesenheit von allem Sumpfgas. Sind auch reine Kohlenstaubexplosionen seltene Erscheinungen, so bedeutet doch die Anwesenheit feinen, trockenen Kohlenstaubes in der Grubenluft insoweit eine große Gefahr, als dadurch die Entzündlichkeit und Explosibilität eines etwa schon vorhandenen Gemisches aus Sumpfgas und Luft noch erheblich gesteigert wird.

Das direkteste Mittel zur Verhütung von Grubenexplosionen bildet offenbar neben guter Ventilation und Milderung der Staubentwicklung durch Berieselung der Kohlenwände die Vermeidung alles dessen, was die Schlagwetter entzünden kann. Hiebei ist übertriebene Ängstlichkeit nicht am Platze, noch weniger freilich eine Mißachtung der Gefahr, wie sie deren Gewöhnung leider häufig mit sich bringt. Von 100 Explosionen sind 87 durch Fahrlässigkeit verschuldet.

Das Funkensprühen der Spitzhaue bei ihrem Schlag auf hartes Gestein hat nie ein Schlagwetter entzündet, ja selbst die Anwendung des Dynamits bei Sprengungen ist unter gewissen Vorsichtsmaßnahmen behördlich gestattet. Bedenken Sie doch auch, daß der Wert der jährlichen Kohlenproduktion der Erde 10.000 Millionen Kronen übersteigt und daß eine Hemmung dieser Produktion nicht nur materielle, sondern auch die kulturellen Interessen der Menschheit aufs schwerste schädigen würde. Hingegen ist die Anwendung offenen Lichtes in der Kohlengrube unbedingt zu vermeiden und bietet selbst die Anwendung elektrischen Lichtes wegen der Funkenbildung an den Kontaktstellen an sich noch keine Sicherheit.

Hier hat nun der Physiker Humphrey Davy schon im Jahre 1816 durch eine einfache Beobachtung das Mittel gefunden, durch welches eine Entzündung der schlagenden Wetter an den zur Beleuchtung nötigen Lichtquellen verhindert werden kann.

Ich habe hier eine brennende Kerze und lasse gegen sie Leuchtgas aus der Leitung strömen. Das Gas entzündet sich sofort. Nun stülpe ich über die Kerze einen Korb aus Metalldrahtnetz und wiederhole den Versuch. Sie sehen, wie sich das Leuchtgas-Luftgemisch innen im Korb an der Kerze entzündet und dort mit blauer Flamme brennt. Aber die Flamme kommt nicht aus dem Korb heraus. Der Korb schützt das außen befindliche Leuchtgas-Luftgemenge vor Verbrennung. Es genügt also, die in der Grube verwendete Lampe mit einem gut schließen-

den, dichten Drahtnetz zu umgeben, um die Entzündung des schlagenden Wetters zu verhüten.

Und nun komme ich erst zu unserem Thema: Wie ist diese Schutzwirkung des Drahtnetzes physikalisch zu erklären?

Vielleicht hat die Erscheinung am ersten Blick etwas Selbstverständliches. Die Flamme schlägt eben durch das engmaschige Netz nicht hindurch, das Netz ist kalt und kühlt die Flamme soweit ab, daß sie nicht weiter greift. Ich will aber versuchen, Ihnen zu zeigen, wie weit diese flüchtige Überlegung vom wirklichen Verständnis der Erscheinung noch entfernt ist.

Beginnen wir mit zwei einfachen, meines Wissens von Prof. Teclu angegebenen Versuchen: Eine starkwandige, unten offene Glaskugel setzt sich nach oben in ein Glasrohr fort. Lassen wir unten in die Glaskugel Leuchtgas einströmen, so können wir es, da ja Leuchtgas so wie Sumpfgas leichter als Luft ist und somit von selbst in die Höhe steigt, am Ende des Glasrohres entzünden. Sperren wir jetzt die Gaszufuhr ab, so mischt sich das Leuchtgas in der Kugel durch die untere Öffnung immer mehr und mehr mit Luft und es entsteht in der Kugel und im Rohr ein explosives Gemenge aus Leuchtgas und Luft. Dieses Gemenge entzündet sich nun an der am Rohrende aufsitzenden Flamme. Die Flamme wird immer kleiner, tritt jetzt in das Rohr, läuft durch das Rohr als zur Rohrachse senkrechte Ebene mit mäßiger Geschwindigkeit herab, bringt aber, sobald sie in die

Kugel eintritt, das dort befindliche Gasgemenge unter heftiger Detonation so gut wie momentan zur Verbrennung. Beachten Sie die verschiedene Geschwindigkeit der beiden Prozesse, das ruhige Fortlaufen der ebenen Brennfläche im Rohr und die stürmische Ausbreitung der Verbrennung in der Kugel. Es ist doch auffallend, daß ein und derselbe Vorgang, nämlich die Fortpflanzung der Verbrennung, mit so verschiedener Geschwindigkeit vor sich geht. Wir werden darauf nochmals zurückkommen.

Betrachten wir zunächst nur die Bewegung der Brennfläche im Rohr. Da sehen wir, wie die ebene, horizontale Brennfläche eben und horizontal nach unten fortschreitet. Dieses Fortschreiten erfolgt mit einer bestimmten, vom Mischungsverhältnis zwischen Leuchtgas und Luft abhängigen Geschwindigkeit, die auch bei den explosibelsten Mischungen $\frac{1}{2}$ m pro Sekunde nicht erreicht. Es liegt auf der Hand, daß ich dieses Fortschreiten der Flamme verhindern kann, wenn ich das Gasgemisch der Brennfläche mit genau der gleichen Geschwindigkeit entgegen bewege, mit welcher sie im ruhenden Gasgemisch fortschritte.

Dies zeigt uns der folgende zweite Versuch:

Ich habe hier einen Bunsenschen Brenner, wie er in den Auerschen Gasglühlichtlampen zur Verwendung kommt. Aus einem engen zentralen Röhrchen strömt das Leuchtgas unten in das Brennerrohr und reißt durch seitlich angebrachte Öffnungen Luft mit sich. Oben strömt also ein Gemisch von Leuchtgas und Luft aus, das ich nun entzünde. Die Flamme, die ich erhalte, be-

steht aus zwei Teilen, aus einem hellen, grünlich leuchtenden Teil, der nahezu vollkommen die Form eines am Rohre aufsitzenden Kegels hat und die eigentliche Brennfläche darstellt, und dem bereits etwas kühleren Flammenvormantel, der diesen Kegel umgibt. Dieser letztere tritt vornehmlich dann auf, wenn der Flamme zu viel Leuchtgas und zu wenig Luft zugeführt wird, wie dies im Bunsenschen Brenner stets der Fall ist. Das überschüssige, in der Brennfläche wegen Sauerstoffmangel unverbrannte Leuchtgas verbrennt dann an der Peripherie des Mantels mit der von außen her an die Flamme gelangenden Luft.

Und nun zu unserem Versuch! Ich stelle den Brenner hier auf ein kleines Tischchen, das ich durch einen Zahntrieb höher und tiefer stellen kann, und bringe vertikal über den Brenner ein Glasrohr von etwa gleicher Weite. Das Gasgemisch steigt aus dem Brenner durch das Glasrohr und kann an dessen oberem Ende entzündet werden, wo es mit derselben kegelförmigen Flamme brennt, die wir eben gesehen hatten, und aus deren Aussehen wir erkennen, daß noch ein bedeutender Überschuß von Leuchtgas vorhanden ist.

Senkt man nun das Tischchen, auf dem der Brenner steht, macht also die Distanz zwischen Brenner und Glasrohr größer, so geschieht zweierlei. Es mischt sich das aus dem Brenner aufsteigende Gasgemisch in dem Zwischenraum zwischen Brenner und Glasrohr stärker mit Luft und wird dadurch explosibler, zweitens wird das Gemisch durch diese Luftzumischung schwerer, der Auftrieb geringer, d. h. die Strömungsgeschwindigkeit des

Gemisches im Glasrohr kleiner. Und so muß es nun ersichtlich durch weiteres langsames Senken des Brenners gelingen, die Verbrennungsgeschwindigkeit des Gemisches zu erhöhen, seine Strömungsgeschwindigkeit zu erniedrigen, bis die beiden einander gleich sind.

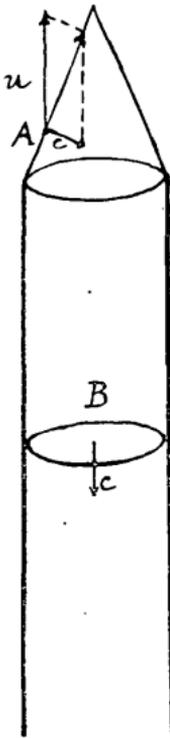


Fig. 1.

Sie sehen, wie der Kegel jetzt oben verschwindet und nur die peripheren Teile des Flammenmantels, die ihre Entstehung dem Luftzutritt von außen her verdanken, zurückbleiben. Statt dessen erscheint im Glasrohr eine nahezu ebene Brennfläche, die, von kleinen Schwankungen, die von Unregelmäßigkeiten in der Gas- und Luftzufuhr herrühren, abgesehen, sich an Ort und Stelle erhält. Hier ist jetzt die Strömungsgeschwindigkeit gleich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Verbrennung.

Ist also *B* die ebene Flamme in dem mit Leuchtgas-Luftgemisch gefüllten Rohr und ist das Gemisch in Ruhe, so läuft sie mit einer gewissen vom Mischungsverhältnis abhängigen Geschwindigkeit, nennen wir sie *c*, von oben nach unten. Lasse ich aber das Gasgemisch von unten nach oben der Flamme entgegenströmen, so wird diese Geschwindigkeit kleiner und sie wird gleich Null, d. h. die Flamme bleibt an Ort und Stelle, wenn die Strömungsgeschwindigkeit gleich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Verbrennung ist.

Mache ich endlich die Strömungsgeschwindigkeit größer als diese Fortpflanzungsgeschwindigkeit, so wird die Flamme aus dem Rohre hinausgetrieben und erhält jetzt über dem Rohre die Form eines dort an Ort und Stelle verharrenden Kegels, wie wir ihn am Bunsenschen Brenner beobachten.

Ist also die Strömungsgeschwindigkeit größer als die Geschwindigkeit der Verbrennung, so vermag sich die Flamme wohl auch noch im Gasstrom an bestimmter Stelle ruhend zu erhalten, aber nicht mehr in Form einer zur Richtung der Strömung senkrechten Ebene, sondern nur auf einer Fläche, die in allen Teilen unter einem bestimmten Winkel gegen die Richtung der Strömung geneigt ist. Diejenigen unter Ihnen, welchen von der Schule her noch das Prinzip bekannt ist, nach welchem sich Bewegungen zusammensetzen, kann das nicht überraschen. Ein Teilchen der kegelförmigen Brennfläche, etwa das Teilchen bei A wird durch die Strömung einerseits mit der Geschwindigkeit u vertikal in die Höhe getrieben, andererseits bewegt es sich infolge der Fortpflanzung der Verbrennung mit der Geschwindigkeit c senkrecht zur Brennfläche, also senkrecht zur Kegelfläche in das Innere des unverbrannten Gasgemisches. Beide Impulse zusammengenommen treiben das Flammenteilchen längs der Diagonale des über u und c errichteten Parallelogrammes. Hierdurch ist die Neigung und der Öffnungswinkel des Brennkegels bestimmt. Es läßt sich dann leicht einsehen, daß dieser Kegel stets eine solche Höhe annimmt, daß der Halbmesser seiner Basis, also

der Halbmesser des Brennerrohres sich zur Seitenlänge des Kegels so verhält wie die Verbrennungsgeschwindigkeit des betreffenden Gasgemisches zu der Geschwindigkeit, mit welcher das Gasgemisch strömt. Man kann also offenbar in einfachster Weise aus der Höhe des Kegels, der Weite des Rohres und der Geschwindigkeit der Strömung die Verbrennungsgeschwindigkeit genau ermitteln. Auch verstehen wir jetzt, daß eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit nicht immer eine Verlängerung des Brennkegels bewirkt.

Unser Bunsenbrenner brennt jetzt mit hoher, grünlicher Flamme. Steigere ich die Luftzufuhr durch Vergrößerung der unten angebrachten Öffnungen, durch welche der Gasstrom die Luft mit sich reißt, so wird die Strömungsgeschwindigkeit größer, der Kegel aber dennoch bedeutend kürzer. Es ist eben zugleich die Zusammensetzung des Gasgemisches durch die gesteigerte Luftzufuhr eine andere geworden, wie Sie das an der Blaufärbung der Flamme erkennen. Die Explosibilität, die Verbrennungsgeschwindigkeit ist größer geworden und der Kegel dadurch kürzer, trotz der erhöhten Strömung.

Schreiten wir nun zur Besprechung der Vorgänge in der Brennfläche selbst. Es verbrennt dort ein Leuchtgas-Luftgemisch von bestimmtem Mischungsverhältnis. Ein solches brennbares Gemisch ist vor allem durch zwei ihm eigentümliche Größen definiert: durch eine bestimmte Entzündungstemperatur und eine bestimmte Verbrennungstemperatur. Halte ich in den Leuchtgas-

Luftstrom eines Bunsenbrenners eine glimmende Lunte, eine glimmende Zigarette, einen dunkelrot glühenden Draht, so entzündet sich das Gasgemisch nicht. Wohl aber entzündet es sich an einer Spiritusflamme, am hellglühenden Draht, an der Flamme brennenden Holzes oder am elektrischen Funken. Man kann nach verschiedenen Methoden diesen Entzündungspunkt bestimmen. Er liegt bei Leuchtgas-Luftgemischen um 600°C .

Ist die Entzündungstemperatur erreicht, dann tritt sofort in unmeßbar kurzer Zeit die Verbrennung ein. Sie besteht in einer chemischen Verbindung des brennbaren Gases mit dem Sauerstoff der Luft. Hierbei erfolgt eine bedeutende Wärmeproduktion und eine momentane Steigerung der Temperatur des entzündeten Gemisches von der Entzündungs- auf die Verbrennungstemperatur. Sie liegt bei Leuchtgas-Luftgemischen um 2000°C .

Und nun können wir die Fortpflanzung der Verbrennung in einen ruhenden Gasgemisch verstehen, wenn wir noch eine allgemeine Eigenschaft der Körper berücksichtigen, ihre Fähigkeit, Wärme zu leiten. Wenn wir einem Metallstab an einem Ende erwärmen, so wird mit der Zeit auch das andere Ende warm. Wenn wir einen heißen und einen kalten Metallwürfel aneinanderdrücken, so kühlt sich der heiße Würfel ab und erwärmt sich der kalte. Die Wärme strömt also von selbst stets von Stellen hoher Temperatur zu solchen tiefer Temperatur, wobei nun freilich die Geschwindigkeit und die Intensität dieser Strömung wesentlich vom Material abhängt, in welchem die Strömung vor sich geht. Sie ist

am größten für Metalle, kleiner für andere feste Körper und für Flüssigkeiten, am kleinsten, aber immer noch meßbar, für Gase.

Ist also in einem Rohre, etwa bei 1 eine ebene, senkrecht zur Rohrachse stehende Brennfläche vorhanden, herrscht also dort die hohe Verbrennungstemperatur von, sagen wir, 2000°C und befindet sich rechts von ihr ein brennbares Gasgemisch, das sich entzündet, sobald seine Temperatur auf 600°C steigt, so ist die Fortpflanzung der Verbrennung in der folgenden Weise als

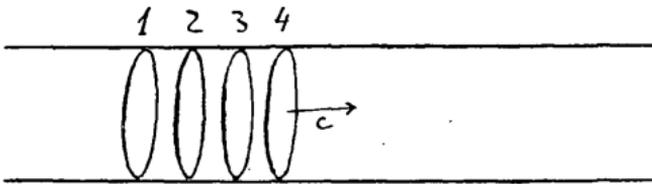


Fig. 2.

Wärmeleitungsvorgang charakterisiert: Die Schichte 1 von 2000°C wird die nächstanliegende Schichte 2 durch den Prozeß der Wärmeleitung rasch auf 600°C erhitzen. Dann tritt dort sofort die Verbrennung ein; die Schichte 2 wird zur Brennfläche und die Temperatur schnell von 600 auf 2000°C in die Höhe. Diese Schichte 2 erhitzt nun ihrerseits wieder die nächstfolgende Schichte 3 auf 600° und bringt sie dadurch zur Verbrennung, die Schichte 3 wieder die folgende Schichte 4 und so fort. Es wird also so die Brennfläche mit einer gewissen Geschwindigkeit, der Verbrennungsgeschwindigkeit c von links nach rechts fortschreiten und man sieht ein, daß

diese Geschwindigkeit außer von Entzündungs- und Verbrennungstemperatur wesentlich durch die Wärmeleitfähigkeit des Gasmisches bestimmt sein wird.

Lassen wir die Brennfläche im Rohre nicht fortschreiten, sondern bewegen wir das Gasmisch der Flamme entgegen, so daß sie in Ruhe bleibt, so ist der Vorgang im Wesen der gleiche. In der Brennfläche herrscht die hohe Verbrennungstemperatur. Das in sie etwa von rechts einströmende Gasmisch muß im Moment, wo es in die Brennfläche eintritt, gerade auf die Entzündungstemperatur erhitzt worden sein. Wäre die Temperatur größer, so würde ja die Verbrennung schon vor dem Eintritt in die Brennfläche erfolgt sein, die Brennfläche bliebe nicht an Ort und Stelle, sondern würde nach rechts wandern, wäre sie kleiner, so würde die Brennfläche nach links aus dem Rohre hinausgetrieben. Da nun für den Fall, daß die Flamme in Ruhe bleibt, die Verbrennungsgeschwindigkeit gleich der Geschwindigkeit der Strömung ist, so können wir sagen:

Es ist die Verbrennungsgeschwindigkeit eines brennbaren Gasmisches gleich der Geschwindigkeit, mit der das Gemisch gegen die Brennfläche, in der die hohe Verbrennungstemperatur herrscht, strömen muß, damit es dort, durch Wärmeleitung erhitzt, gerade mit Entzündungstemperatur eintrifft.

Es muß also mit anderen Worten die in einer bestimmten Zeit, etwa einer Sekunde, aus der Brennfläche in das Gasmisch eindringende Wärmemenge gerade hinreichen, um die in der Sekunde in die Brennfläche

einströmende Gasmenge auf Entzündungstemperatur zu erhitzen.

Es liegt auf der Hand, daß diese Wärmemenge eine um so größere Gasmenge auf Entzündungstemperatur bringen kann, je höher die Temperatur des Gasgemenges schon zu Anfang ist. Mit Erhöhung der Anfangstemperatur wächst also die Verbrennungsgeschwindigkeit des Gasgemenges. Das ist eine Tatsache, die nicht nur für brennbare Gasgemische, sondern für einen jeden Explosivstoff gilt. So ist es den Artilleristen wohl bekannt, daß die Kanonen im Sommer weiter schießen als im Winter. Die höhere Anfangstemperatur steigert die Verbrennungsgeschwindigkeit des Pulvers und damit den im Geschützrohr entwickelten Druck, von dessen Höhe die Tragweite des Geschützes abhängt.

Noch eine andere Erscheinung lernen wir verstehen, die auf den ersten Anblick etwas Überraschendes hat. Betrachten wir den Flammenkegel des Bunsenbrenners. Er bezeichnet die Stelle, an welcher das noch unverbrannte Gasgemisch die Entzündungstemperatur erreicht und unvermittelt an die noch weit höher temperierte Flamme grenzt, also die Fläche, aus welcher heraus der Wärmestrom in das Innere des zuströmenden Gasgemisches eindringt und es auf Entzündungstemperatur erwärmt. Da aber das Gasgemisch sich diesem Wärmestrom entgegengewegt und, wie ich früher erwähnte, eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt, so reicht die Wärme nicht tief in den Gasstrom hinein, d. h. der ganze Prozeß der Erwärmung des Gasgemisches von Anfangstemperatur

auf Entzündungstemperatur vollzieht sich nur in einer sehr dünnen Schichte, die kaum $\frac{1}{10}$ mm tief in das Gasgemisch hineinreicht. Weiter innen ist es kalt, hat keine andere Temperatur, als die ist, mit der es unten in den Brenner einströmt. Die kegelförmige Brennfläche umgibt also Gas von Zimmertemperatur. Halte ich quer durch die Flamme hindurch einen Kohlenfaden, wie er in den Glühlampen zur Verwendung kommt, so sehen Sie ihn in der Brennfläche und im Flammenmantel glühen, im Innern des Kegels bleibt er aber kalt. Entzünde ich

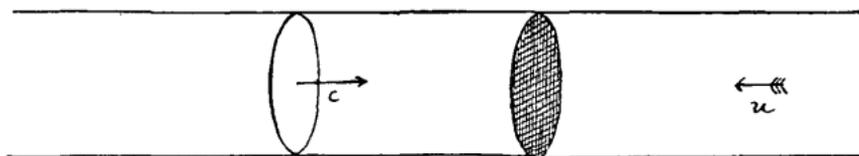


Fig. 3.

hier um eine kleine, mit etwas Schießpulver gefüllte Schale eine Flamme, so verpufft das Schießpulver erst dann, wenn ich die Flamme durch Schwächung der Gaszufuhr so klein gemacht habe, daß sie das Pulver berührt.

Und nun sind wir endlich über den Vorgang der Verbrennung genügend orientiert, um die Schutzwirkung von Metalldrahtgittern gegen Gasexplosionen wirklich verstehen zu können.

Betrachten wir wieder eine ebene Brennfläche in einem Rohre. Wäre das rechts von ihr befindliche brennbare Gasgemisch in Ruhe, so würde sich diese Brenn-

fläche mit der Verbrennungsgeschwindigkeit c von links nach rechts bewegen. Bewegen wir das Gasgemisch mit der Geschwindigkeit u der Brennfläche entgegen, so wird, wenn u kleiner als c ist, sich die Brennfläche immer noch von links nach rechts bewegen, aber jetzt nicht mehr mit der Geschwindigkeit c , sondern nur mehr mit der Differenz beider Geschwindigkeiten $c - u$. Denken wir uns nun irgendwo in der Röhre ein Netz aus Metalldrähten der Flamme entgegengestellt. Das wird, wofern die Drähte dünn sind, an der Bewegung der Flamme zunächst gar nichts ändern. Erst wenn die Flamme sich dem Netze so weit genähert hat, daß die von ihr ausgehende Wärmeströmung das Drahtnetz erreicht, erst dann beginnt seine Wirkung. Es wird nämlich jetzt ein Teil der sonst ausschließlich zur Erhitzung des Gemenges von Anfangs- auf Entzündungstemperatur verbrauchten Wärmemenge vom Netz aufgefangen und, da Metalle vorzügliche Leiter der Wärme sind, sofort an das Rohr und die Umgebung des Rohres abgegeben. Das hat nach unseren früheren Ausführungen eine Verminderung der Verbrennungsgeschwindigkeit zufolge; denn da wir eingesehen haben, daß diese Geschwindigkeit durch die Gasmenge bestimmt ist, welche die aus der Brennfläche einströmende Wärmemenge auf Entzündungstemperatur zu erhitzen vermag, muß jede Verminderung dieser Wärmemenge eine Verminderung der Verbrennungsgeschwindigkeit bewirken.

Der Vorgang ist also der folgende: Es bewegt sich zunächst die Flamme mit der Geschwindigkeit $c - u$

gegen das Netz. Hat die Reichweite der von ihr ausgehenden Wärmeströmung das Netz erreicht, dann wird die Verbrennungsgeschwindigkeit c kleiner, und zwar immer kleiner, je mehr sich die Flamme dem Netze nähert. Damit nimmt gleichzeitig auch $c-u$, die Bewegungsgeschwindigkeit der Flamme mehr und mehr ab und schließlich wird die Flamme vor dem Drahtnetz in einer bestimmten Distanz zur Ruhe kommen, die dadurch gegeben ist, daß für sie der Wärmeverlust an das Drahtnetz die Verbrennungsgeschwindigkeit gerade auf die Strömungsgeschwindigkeit erniedrigt. Diese Distanz wird offenbar um so kleiner sein, je kleiner die Strömungsgeschwindigkeit des Gasgemisches ist. Ist schließlich diese Geschwindigkeit gleich Null, d. h. ist das brennbare Gasgemisch in Ruhe, so kann wohl die Flamme vor dem Netz nicht völlig zur Ruhe kommen. Sie wird sich aber jetzt mit immer kleiner werdender Geschwindigkeit dem Netze immer mehr und mehr nähern, bis endlich die Wärmeverluste an das Netz so groß werden, daß der Rest zur Fortleitung der Verbrennung überhaupt nicht mehr ausreicht und die Flamme erlöscht. Die Wirkung des Netzes besteht also nicht darin, daß die Flamme durch das Netz gekühlt, die Verbrennungstemperatur des Gasgemisches erniedrigt wird, vielmehr besteht sie darin, daß die Verbrennungsgeschwindigkeit des Gemisches herabgesetzt wird.

Ich habe hier wieder die schon früher verwendete Glaskugel mit dem oben vertikal angesetzten Glasrohr. Ehe ich aber jetzt das Leuchtgas entzünde, lege ich auf

die Öffnung des Glasrohres ein Drahtnetz. Nach Absperren des Gashahnes bildet sich wieder in der Kugel und im Rohre durch Mischung mit der Außenluft ein brennbares Gasgemisch von mit der Zeit zunehmender Explosibilität. Der Brennkegel wird immer kürzer und verwandelt sich schließlich in eine zur Rohrachse senkrechte Ebene. Aber diese Brennfläche wandert nun nicht nach unten wie früher, sondern bleibt in außerordentlich kleiner Distanz über dem Drahtnetz schweben. Wohl wird, wie man durch genaue Beobachtung aus der Nähe erkennt, diese Distanz zwischen Flamme und Netz zunächst immer kleiner, aber die Flamme schlägt nicht durch das Netz hindurch und würde schließlich erlöschen. Das Netz schützt das Gas im Rohre und in der Kugel vor der Verbrennung. Im Moment, wo ich das Netz wegziehe, erfolgt die Explosion.

Und damit hätte ich unser Thema bis auf einen Punkt erschöpft, den ich zum Schlusse noch kurz berühren möchte.

Ich habe früher erwähnt, daß die Verbrennungsgeschwindigkeit in Leuchtgas-Luftgemischen auch für den Fall größter Explosibilität (wenn in 100 Raumteilen des Gemisches etwa 17 Raumteile Leuchtgas enthalten sind) $\frac{1}{2}$ m pro Sekunde nicht übersteigt. Damit steht eine Erfahrungstatsache scheinbar in Widerspruch, nämlich die große Geschwindigkeit, mit der sich bekanntlich die Verbrennung in größeren Räumen unter den Formen einer alles zerstörenden Explosion ausbreitet. In der Tat, würde sich die Flamme vom Entzündungspunkt nur mit

30—40 cm Geschwindigkeit ausbreiten, dann könnten wir einen mit einem Leuchtgas-Luftgemisch gefüllten großen Raum mit offenem Licht betreten und hätten reichlich Zeit, uns vor der Flamme zurückzuziehen.

Sie haben früher den großen Unterschied bemerkt, der zwischen der Geschwindigkeit besteht, mit der die Flamme im Glasrohr fortschreitet und mit welcher sie sich in der Glaskugel ausbreitet. Also auch hier einerseits die ruhige, mit mäßiger Geschwindigkeit erfolgende Verbrennung im Glasrohr und die plötzliche Detonation in der Glaskugel.

Ich will versuchen, diesen Widerspruch so weit aufzuklären, als dies mit wenigen Worten möglich ist.

Bedenken Sie zunächst, daß die Gasmasse, die von der Verbrennung ergriffen wird, sich sehr beträchtlich ausdehnen, ihr Volumen vergrößern muß. Alle Körper, besonders aber die Gase dehnen sich ja beim Erwärmen aus. Wird Luft von 0°C auf 273°C erhitzt, so vergrößert sich ihr Volumen auf das Doppelte und genau so verhalten sich auch alle anderen Gase und Gasgemische. Nun, die Temperatur des Gasgemisches, das unsere Flamme bildet, beträgt etwa 2000°C und wir erkennen daraus, daß in den von der Verbrennung ergriffenen Gasschichten das energische Bestreben vorhanden sein muß, sich auszudehnen, ihr Volumen auf das Vielfache des Anfangswertes zu vergrößern.

Tritt also die Flamme unten aus dem Glasrohr in die Kugel und ergreift dort die Verbrennung die mittleren Partien des in ihr enthaltenen Gasgemisches, so

dehnen sich diese Partien sofort sehr bedeutend aus und drücken nun hierdurch die äußeren Partien des Gasgemisches, die noch unverbrannt sind, mit großer Kraft gegen die Glaswände der Kugel. Beruht ja doch auf dieser Druckvermehrung die zerstörende Wirkung der Explosionen. Die Zusammendrückung der noch unverbrannten Teile des Gasgemisches hat aber zur Folge, daß sie sich erwärmen. Auch darin unterscheiden sich ja die Gase in nichts von anderen Körpern. Schlage ich mit einem Hammer auf einen Bleiklotz, so wird das Blei warm. Schlage ich mit dem Hammer auf Knallquecksilber, so steigt seine Temperatur so weit, daß es sich entzündet und explodiert. Freilich bis zur Entzündungstemperatur werden die äußeren Schichten des Gasgemisches in der Kugel durch die Zusammenpressung von der Mitte aus kaum erhitzt werden. Presse ich ein Gas durch einen Stempel rasch auf die Hälfte seines Volumens zusammen, so steigt hierdurch seine Temperatur höchstens um 90° C. Doch wird zweifellos immerhin durch den erwähnten Prozeß eine sehr beträchtliche Vorwärmung der unverbrannten Gasschichten erzielt. Das hat aber nach den früheren Ausführungen eine Steigerung der Verbrennungsgeschwindigkeit zur Folge; denn wir haben ja eingesehen, daß jede Erhöhung der Anfangstemperatur ein schnelleres Fortschreiten der Flamme zur Folge hat. So erreicht die Verbrennungsgeschwindigkeit rasch anwachsend in größeren Räumen Werte, die bis zu 8 m in der Sekunde hinaufgehen, also mehr als das 16 fache des normalen Wertes betragen.

Meine Damen und Herren! Wir sind von der Schutzwirkung der Drahtgitter gegen Gasexplosionen ausgegangen und haben, indem wir diese Erscheinung zu verstehen suchten, eine Reihe wichtiger Aufschlüsse über die Natur der Flamme und der explosiven Vorgänge überhaupt gewonnen. Es ist dies auch der Weg, den die Wissenschaft gegangen ist. Die ersten Abhandlungen über Explosionen finden sich in den „Annales des mines“, der wichtigsten montanistischen Zeitschrift Frankreichs. So sehen wir auch hier, daß es die Not des Lebens, der Kampf ums Dasein ist, der die Wissenschaft befruchtet.
