

№/299

Borisov, A. A., Gel'fand, B. E.

(Institut für chemische Physik der Akad.d.Wiss.d.UdSSR,  
Moskau)

ÜBERSICHT ÜBER DIE ARBEITEN ZUR DETONATION VON  
ZWEIPHASENSYSTEMEN

Deutsche Vollübersetzung aus:

Archiwum termodynamiki i spalania. Warszawa,  
7 (1976), Nr 2, S. 273 - 287.

Russ.: Обзор работ по детонации двухфазных  
систем  
Obzor rabot po detonacii dvuchfaznych sistem

Summary

An analysis of the matter of art is given in the paper. Recent studies on initiation and wave structure of detonations in spraied liquid-fuel-gaseous oxidizer systems are considered. The problems which require further more detailed experimental and theoretical investigations are discussed. These problems are: structure of detonation waves in sprays with droplets of the diameter in the range 20—200  $\mu$ , detonations in dense sprays detonations in systems with an inert gaseous or liquid diluent, pressure and impuls measurements.

An effort is made to explain the high stability of the heterogeneous waves. Mixing and mass-transfer processes are analysed on the base of existing models of droplet shattering. Some preliminary conclusions are made concerning the wave structure and detonation characteristics in systems enriched with liquid fuel.

Bezeichnungen

$C_H$	Koeffizient, gleich $2,5 \cdot 10^{-5}$
$d$	Tropfendurchmesser
$d_0$	Anfangsdurchmesser des Tropfens
$D_1$	theoretische Geschwindigkeit der idealen Detonation
$D_2$	Geschwindigkeit der nichtidealen Detonation im 2-Phasensystem
$l_1$	Länge des Reaktionsbereichs
$M_1$	Machsche Zahl der Detonationswelle
$n$	Anzahl der Partikel pro Volumen
$p_{H_2}, p_{O_2}$	Partialdrücke von $H_2$ und $O_2$
$r_R$	hydraulischer Rohrdurchmesser
$t_1 = \frac{d}{u} \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_2}}$	charakteristische Tropfen-Zerfallszeit
$t^* = t/t_1$	dimensionslose Zeit
$u$	Gasgeschwindigkeit
$W$	Weber-Zahl
$W^*$	zerfallskritischer Wert der Weber-Zahl
$X_{H_2}$	relative $H_2$ -Konzentration
$\gamma$	Verhältnis der Wärmekapazität $C_p/C_v$ im Gas
$\gamma_3$	Verhältnis der Wärmekapazität $C_p/C_v$ in den Reaktionsprodukten
$\pi_0 = T_0 d_0$	Umfang des ursprünglichen nichtverformten Tropfens
$\pi_m \approx 3\pi_0$	maximaler Umfang des verformten Tropfens
$\rho_0$	ursprüngliche Gasdichte
$\rho_1$	Gasdichte
$\rho_f$	Flüssigkeitsdichte
$\rho$	Oberflächenspannung der Flüssigkeit

## Einleitung

Im Unterschied zur Detonation gasförmiger Brennstoffe, einem Untersuchungsgegenstand der vergangenen Jahrzehnte, ist die Detonation der 2-Phasensysteme erst seit relativ jüngster Zeit Gegenstand sorgfältiger Untersuchungen. Die vorliegenden Mitteilungen über die Besonderheiten der Detonation von 2-Phasensystemen (der heterogenen Detonation) lassen aber manche bestimmten Schlußfolgerungen über die Art dieses Vorgangs, seinen Ähnlichkeitsgrad und Unterschied zur Detonation gasförmiger Systeme zu. Der Vergleich mit den Eigenschaften gasförmiger Systeme rührt daher, daß der Volumenanteil der Flüssigkeit in den meisten Fällen (ausgenommen die Systeme mit hohem Druck) gering ist und daß allein die Gaskomponente des Gemisches das Volumen des Systems bestimmt.

Eine Systematisierung der vorhandenen Untersuchungsergebnisse der 2-Phasendetonation ist leider zu kompliziert, da es keiner einzigen Forschergruppe gelang, die Fragen abschließend zu behandeln, die mit dem Verbrennungsmechanismus des Brennstoffes zusammenhängen. Gegenwärtig ist unser Wissensstand über diesen Vorgang im Stadium der qualitativen Erkenntnis der Grundvorgänge und semiquantitativer, halbempirischer Relationen zur Berechnung der Wellenstruktur.

Einen Versuch zur Systematisierung der experimentellen und theoretischen Angaben über die 2-Phasendetonation unternahmen in einer Übersicht Dabora und Weinberger /1/. Diese Arbeit ist leider der erste wirkliche Überblick über dieses Forschungsgebiet. Sie braucht jedoch wesentliche Ergänzungen, sowohl im experimentellen Teil als auch bei den Ableitungen und der theoretischen Behandlung der Ergebnisse (dies gilt insbesondere für den Zerfall der Flüssigkeitstropfen in der Welle).

Gegenstand unserer Untersuchung ist nur die Frage der Detonation von 2-Phasensystemen, die ein Gemisch aus Tropfen einer Komponente und aus einer zweiten gasförmigen Komponente darstellen. Flüssige Komponente ist meistens ein Brennstoff, gasförmige ein Oxydator.

Am Beginn der experimentellen Untersuchungen über die Detonation eines Gemisches aus einem gasförmigen Oxydator und einem zerstäubten Flüssigbrennstoff standen die Arbeiten von Webber /2, 3/. Webbers Arbeiten wurden darauf in einigem durch Cramer /4/ ergänzt. Bei den Arbeiten /2 - 4/ liegt das Hauptaugenmerk auf der Entstehung der Detonation in einem 2 Phasensystem und nicht auf der Detonation selbst. Dennoch gelangte Webber zu der äußerst wichtigen Schlußfolgerung, daß der Zerfall der Tropfen sowohl bei den Übergängen als auch bei der Detonation eines 2-Phasensystems die bestimmende Rolle spielt. Diese Schlußfolgerung von Webber über die entscheidende Funktion des Tropfenzerfalls diente als Basis für die weiteren Untersuchungen.

Theoretisch ist der Prozeß der Detonation von 2-Phasensystemen am frühesten in den Arbeiten von Williams /5, 6/ untersucht worden. Ausgehend von den klassischen Vorstellungen über die Struktur einer eindimensionalen Detonationswelle und dem Verbrennungsmodell der Tropfen zeigte er, daß in den meisten Fällen praktisch keine Detonation eines 2-Phasensystems erfolgen kann, wenn es keinen effektiven Bildungsvorgang eines homogenen oder quasihomogenen Brennstoffgemisches hinter der Detonationswellenfront gibt. Unter Bezug auf die Ergebnisse in den Arbeiten /2, 3/ stellte er außerdem die Hypothese auf, daß der Zerfall der Tropfen bei der Untersuchung der Prozesse im Reaktionsbereich unbedingt berücksichtigt werden müsse.

In den letzten Jahren wurde die Detonation von 2-Phasensystemen in Rohren experimentell ausführlich untersucht. Diese wurden mit Tröpfchenerzeugern und hochfrequenten und piezoelektrischen Druckaufnehmern sowie photographischen Geräten ausgestattet. In den Arbeiten /7 - 17/ und /19 - 22/ wurde die Detonation in Systemen von flüssigem diäthylcyclohexanförmigem Sauerstoff bei normalen Anfangsbedingungen untersucht. Der Tropfendurchmesser lag bei 290 - 2 600  $\mu\text{m}$ . Der überwiegende Teil der Experimente erfolgte in Gemischen mit Oxidatorüberschuß. Die Ergebnisse der Detonationsgeschwindigkeitsmessung mit Zerstäubern verschiedener Durchlässigkeit werden in Abb. 1 mit

den theoretischen Werten (durchgehende Linie) verglichen. Die Angaben zur Detonation in 2-Phasen-Sauerstoffgemischen mit  $d_0 = 290 - 2\,600 \mu\text{m}$  stammen aus den Arbeiten /7/, /10/ und /11/ und die zur Detonationsgeschwindigkeit in denselben Gemischen bei bis zu  $\sim 10 \mu\text{m}$  aus den Arbeiten /24/ und /39/. Wie aus der Abbildung hervorgeht, nimmt die Detonationsgeschwindigkeit mit zunehmendem Tropfendurchmesser um 50 - 60 % des theoretischen Wertes ab, der anhand der üblichen thermodynamischen Relationen berechnet wurde.

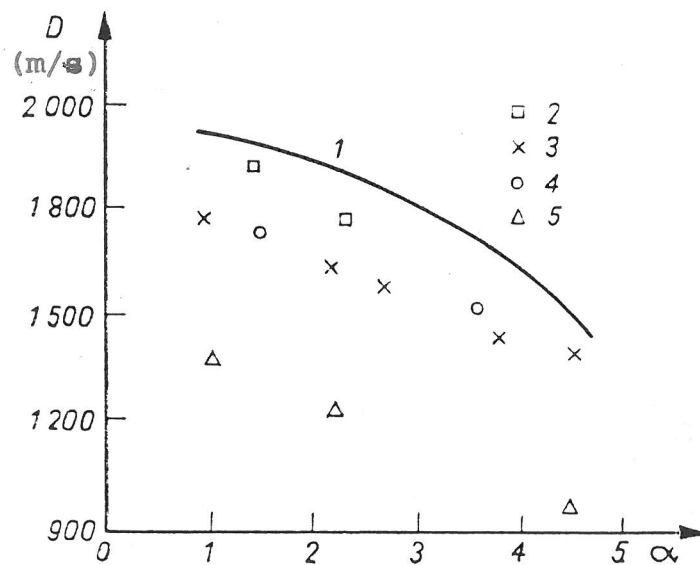


Abb. 1. Veränderung der Detonationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Zusammensetzung und Größe der Tropfen

1) theoretisch; 2)  $d_0 = 1 - 10 \mu\text{m}$ ; 3)  $d_0 = 290 \mu\text{m}$ ; 4)  $d_0 = 900 \mu\text{m}$ ; 5)  $d_0 = 2\,600 \mu\text{m}$

Eine derartige Abhängigkeit der Detonationsgeschwindigkeit vom Tropfendurchmesser und andere Fakten lassen die Schlussfolgerung zu, eine Zweiphasigkeit dürfe faktisch nur mit Zerstäubern auftreten, die zu Abmessungen der Partikel über einem bestimmten Wert führen (offensichtlich über  $10 \mu\text{m}$ ).

Auf anschauliche Weise kann man den Unterschied zwischen 2-Phasendetonationen und gasförmigen z.B. am Verhalten einiger ihrer Parameter hinter der Wellenfront verfolgen. So sinkt der Druck hinter der Druckwellenfront in einem 2-Phasensystem wesentlich langsamer als bei der Gasdetonation. Bei der 2-Phasendetonation beginnt der Druckabfall langsamer als bei der Gasdetonation. Und bei konstantem mittlerem Druck beobachtet man im Druckbereich starke sekundäre Erregungen, die die vordere Wellenfront überholen.

In den Arbeiten /25/, /27/ und /29/ wurden einige mögliche Mechanismen der Umformung von Tropfen in Verbrennungsprodukte analysiert: Verdampfung von Tropfen, Zerfall mit Explosion der Flüssigkeitsoberflächenschicht und Zerfall unter Berücksichtigung der Tropfenverformung. Unter Heranziehung der bekannten Modelle für die Verdampfung der Tropfen in den Verbrennungskammern von Raketenmotoren wurde in /42/ aufgezeigt, daß bei vernünftigen Werten der Länge der Verbrennungszone nur bei Tropfen mit einem Durchmesser unter  $10 \mu\text{m}$  die Verdampfung für die Geschwindigkeit der Umwandlung von Flüssigkeit in Dampf ausreichend ist. Bei größeren Tropfen wird der Verbrennungsbereich des Gemisches wesentlich größer als erwartet, was experimentell ebenfalls festgestellt wurde (dies gilt sowohl für die Energieverluste als auch für die anderen beim Experiment aufgezeichneten Werte). Durch Zerfall der Tropfen infolge Explosion der Flüssigkeitsoberflächenschicht steigt die Verdampfungsgeschwindigkeit der ursprünglichen Tropfen aufgrund zunehmenden Dispersionsgrades des Brennstoffes, folglich auch aufgrund einer größeren Oberfläche beim Verdampfen. Aber auch beim beschriebenen Verfahren der Umwandlung von flüssigem Brennstoff liegt eine wesentliche Differenz vor zwischen den rechnerischen und den experimentellen Werten für die Länge des Reaktionsbereiches. Nach den Berechnungen muß die Zeit bis zur vollständigen Brennstoffverbrennung 5 - 10 mal größer ausfallen, als im Versuch festgestellt.

In der Arbeit /29/ wird dieser Widerspruch zwischen Theorie und Experiment durch die Hypothese beseitigt, der Tropfen zerfalle zum Zeitpunkt des Erreichens des kritischen Verformungsstadiums schnell in mehrere Teile. Auf dieser Hypothese wurde die Annahme der nachfolgenden Reihe von Erscheinungen im Reaktionsbereich konstruiert. Beim Umströmen eines Tropfens durch einen Gasstrom beginnt die Zerstörung des Tropfens, die sich anfänglich als Flüssigkeitsschichtablösung vollzieht. Gleichzeitig führt die entstehende Tropfenverformung dazu, daß die ursprünglichen Tropfen zu einem bestimmten Zeitpunkt schnell zerfallen. Dies wiederum führt zu einer wesentlich stärkeren Verdampfungsgeschwindigkeit der sekundären Tropfen, einer Vermischung des Brennstoffs mit dem Oxydator und damit zu einer Druckzunahme im Reaktionsbereich. Die entlang der Strömung vom Ursprungsort der Druckzunahme stromaufwärts und stromabwärts ausgehenden sekundären Wellen sichern die Zuspeisung der Wellenfront und geben der Welle eine völlig andersartige Struktur als die der normalen Gasedetonation.

## 1. Tropfenzerfall

Da die Verbrennung von Gas-Flüssigkeitssystemen bei schwachen oder starken Stoßwellen eng mit den Vorgängen des Tropfenzerfalls zusammenhängt, muß man selbstverständlich gerade diese Frage zuerst näher untersuchen.

Noch vor jüngster Zeit hatten die Untersuchungen über den Tropfenzerfall sehr wenig Berührungspunkte mit dem Studium der Verbrennungsvorgänge. Einige bekannte Vorstellungen über den Zerfall /30 - 32/ konnten nicht direkt zur Analyse der Verbrennung und der heterogenen Detonation benutzt werden. Deshalb mußten die vorhandenen Anschauungen über den Zerfallsprozeß kritisch untersucht werden. Auch mußten spezielle Untersuchungen erst durchgeführt werden /33 - 38/. Man kann sich leicht davon überzeugen, daß die Weber-Zahl  $W$  bei der für die heterogene Detonation typischen Geschwindigkeit und Dichte des Gases sogar bei  $d \approx 10^{-6}$  m über dem kritischen Wert  $W^* \approx 5 \div 7$  liegt.

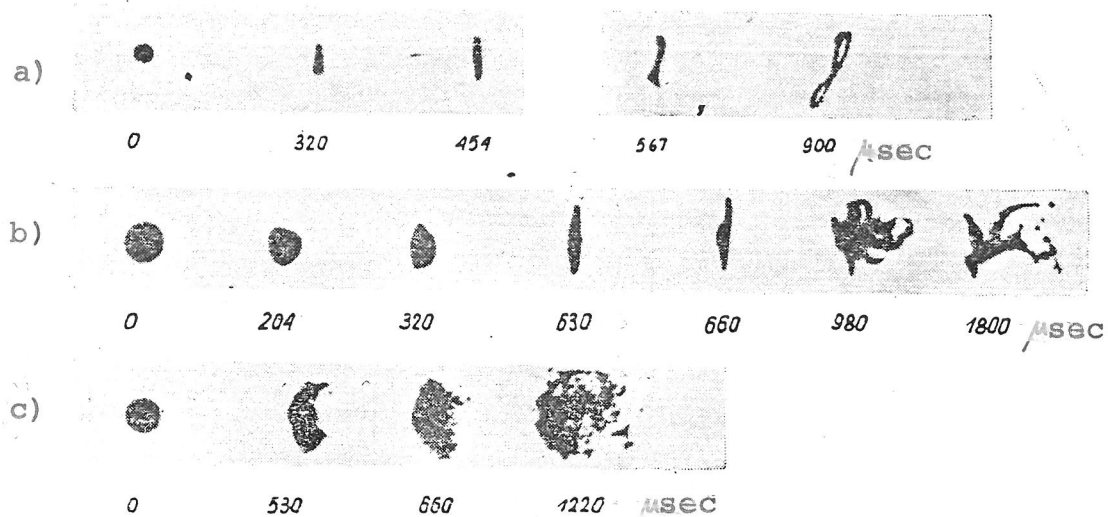


Abb. 2. Verschiedenartigkeit des Tropfenzerfalls in der Stoßwelle

a)  $M = 1,08$ ,  $d_0 = 0,5$ , Wasser,  $W = 12$ ; b)  $M = 1,12$ ,  $d_0 = 0,9$ , Wasser,  $W = 35$ ; c)  $M = 1,16$ ,  $d_0 = 1$ , Wasser,  $W = 86$



Beschränkt man sich jedoch nicht nur auf die Untersuchung der voll ausgeprägten Detonation, sondern berücksichtigt auch den Übergang von der Verbrennung zur Detonation, dann wird klar, daß die Weber-Zahl je nach den konkreten Bedingungen Werte haben kann, die sowohl annähernd kritisch bis vorkritisch als auch äußerst weit entfernt von den kritischen Werten sein können (**suprakritisch**). In diesem Zusammenhang ist eine Klassifikation der grundsätzlichen Verschiedenartigkeiten der möglichen Zerstörung der Tropfen in den Stoßwellen interessant, wobei wir als Hilfsgröße die Weber-Zahl nehmen. Abb. 2 zeigt die aus der Arbeit /37/ entnommenen Fotografien. Sie stellen die möglichen Arten der Tropfenzerstörung dar. Im Bereich der Weber-Zahlen  $W = 5 - 10$  kommt es zu dem in der Literatur /31/ wohlbekannten Zerfallstyp des Zerfallens im "Sack" ("Regenschirm"). Der Tropfenzerfall zeichnet sich aus durch eine zunehmende Tropfenverformung, einem Abblasen des dünnen Films mit darauffolgendem Zerfall des Films und danach des flüssigen Kerns. Der Grad der Zunahme der Flüssigkeitsoberfläche nach dem Zerfall ist in diesem Fall gering (Abb. 2a). Bei den Weber-Zahlen von  $W = 10 - 30$  liegt ein Zerfallstyp vor, den man aufgrund der unbestimmten Tropfenform im Schlußstadium als chaotisch bezeichnen kann (Abb. 2b). Aus der Masse des verformten Tropfens werden rein zufällig einzelne Flüssigkeitspartikel herausgerissen. Die feine Zerstäubung der ursprünglichen Tropfen nimmt zu, und das Maximum der Zerstörungsgeschwindigkeit bewegt sich in Richtung der Stoßwellenfront. Die Umströmung der Tropfen durch den Gasstrom hinter der Stoßwelle bei den Weber-Zahlen  $W > 30 - 50$  wird anfangs von einer Verformung der Tropfen und Explosion der Oberflächenschicht begleitet. Zu einem späteren Zeitpunkt, nahe bei  $t_1 = du^{-1} \sqrt{\rho_f / \rho_0}$  tritt hinter der Welle eine schnelle Zerstörung der Tropfen ein. Die Verfasser der Arbeiten /35/ und /41/ bringen dies in Zusammenhang mit einem Tropfenzerfall aufgrund instabiler Phasentrenngrenze Gas - Flüssigkeit. Nimmt die Stärke des Umströmens des Tropfens weiter zu, dann entwickelt sich bei den Weber-Zahlen  $10^4 - 10^5$  die Instabilität so schnell, daß der Tropfen in unmittelbarer Nähe der Wellenfront innerhalb von  $t_2 < t_1$  in viele kleine Teile aufgelöst wird, ohne daß ein deutlich ausgeprägtes Stadium des Ablösens der Flüssigkeits-

schicht bemerkbar wäre /33, 41/. Die Geschwindigkeit des Tropfenzerfalls ändert sich, wie in Abb. 3 dargestellt. An der Abszisse der Zeichnung ist das Verhältnis der laufenden Zeit  $t$  zum Parameter  $t_1$  aufgetragen. Wie aus der Zeichnung hervorgeht, steigt die Geschwindigkeit des Tropfenzerfalls mit zunehmender Weber-Zahl sehr stark.

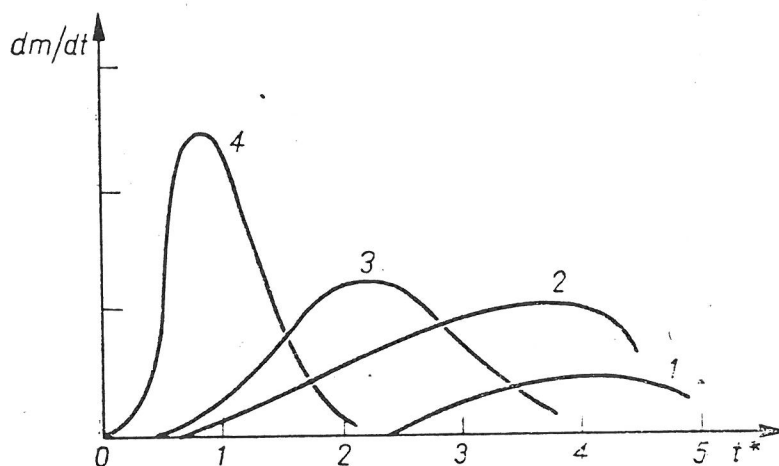


Abb. 3. Veränderung der Geschwindigkeit des Tropfenzerfalls bei verschiedenen Weberzahlen

1)  $W = 5 - 10$ ; 2)  $W = 10 - 15$ ; 3)  $W = 15 - 10^3$ ; 4)  $W > 10^3$

Es gibt aber auch noch eine andere Vorstellung über den Mechanismus des Tropfenzerfalls, wie sie in den Arbeiten von Ranger u.a. /32/ entwickelt wurde. Die Verfasser dieser Arbeit /32/ und danach auch einige andere /43/ bringen den Tropfenzerfall allein mit dem Abreißen der Flüssigkeitsgrenzschicht vom Tropfen in Zusammenhang. Bei der Analyse der bestehenden Zerfallsmodelle wurde in /35/ und /41/ aufgezeigt, daß man anhand dieser Hypothese erstens keinesfalls die oben genannten Besonderheiten des Tropfenzerfalls erklären kann. Zweitens kann man auch nicht die Ursachen für die experimentell festgestellte starke Beschleunigung der Tropfenverbrennung im Zeitpunkt  $t \approx (1 \div 1,5) t_1$  verstehen (zu dieser Zeit dürfen vom Tropfen nicht mehr als 10 % der ursprünglichen Masse abgerissen worden sein). Man kann damit einverstanden sein, wie in den

Arbeiten /32/ und /43/ die Veränderung von Durchmesser und Anzahl der zerfallenden Tropfen im zeitlichen Ablauf erklärt wird (Abb. 4). Die experimentellen Beobachtungen stimmen nur für die Zeit  $t^*$  bis 1,5 mit den theoretischen Werten überein. Die Veränderung des Tropfendurchmessers nach dem Zeitpunkt  $t^* \approx 1,5$  und vor seinem völligen Zerfall kann nicht als charakteristisch bezeichnet werden für diesen Ablösungsmechanismus, nach dem ein lineares Abnahmegesetz des Tropfendurchmessers vom Wert  $d \approx 3 d_0$  bei  $t = t_1$  auf  $d_0 \approx 0$  bei  $t_3 = (4 - 5)t_1$  resultieren würde. Fotografien der Tropfen unter den bei Detonationswellen typischen Bedingungen /33/ zeigen, daß im Zeitpunkt  $t_1 - t_3$  der Tropfen seine Unversehrtheit nicht beibehält, sondern daß sich im Gasstrom ein Ensemble von Teilchen unterschiedlichen Durchmessers zwischen  $d \approx 0,2 d_0$  bis  $0,01 d_0$  bildet. Deshalb ist es zweckmäßiger, die Folgen des Auftretens einiger feiner Teilchen anstelle des ursprünglichen Tropfens im Gasstrom zum Zeitpunkt  $t \approx 2t_1$  zu analysieren. Zum besagten Zeitpunkt behält der ursprüngliche Tropfen seine ursprüngliche Geschwindigkeit praktisch noch bei, was auch erklärt, daß die sekundären Teilchen (zumindest die größten) durch Abreißen der Flüssigkeitsgrenzschicht weiter zerfallen können. Gerade dieser Umstand würde in den Arbeiten /32/ und /43/ nicht berücksichtigt und er ist ein wesentlicher Mangel in Rangers Theorie, wonach der Umfang der flüssigen Tropfen im Zeitpunkt  $t_1$  sein Maximum erreicht und danach abzunehmen beginnt. Die Zerstörungsgeschwindigkeit nach dem Mechanismus mit Abreißen der Schicht ist jedoch proportional zum Umfang der Teilchen. Tatsächlich führt die Aufteilung des ursprünglichen Tropfens in  $n$  etwa kugelförmige Teilchen (wobei  $n$  ausreichend groß ist) zur Zunahme des Umfangs  $\Pi_2$  nach der Relation

$$\Pi_2 \approx 0,33 \Pi_m n^{0,66} .$$

Hierbei berücksichtigt der Koeffizient 0,33 die maximale Verformung des ursprünglichen Tropfens. Aus dieser Relation folgt, daß der Gesamtumfang bei Aufteilung des ursprünglichen Tropfens in mehr als 5 Teile während des gesamten Zerfalls nicht abnimmt. Macht man die etwas grobe, dennoch aber völlig natürliche Annahme, daß die Zahl der sekundären Tropfen gleich der

Zahl der Instabilitäts-Wellenlängen nach Rayleigh-Lamb-Taylor ist, bezogen auf den Durchmesser des verformten Tropfens, dann ist

$$\Pi_{\Sigma} \approx 0,33 \Pi_m W^{0,33}.$$

Ein annäherndes Bild der Umfangszunahme der Teilchen ist in Abb. 4 dargestellt. Unter Berücksichtigung dessen, daß darauffolgende Teilungsvorgänge der sekundären Tropfen wahrscheinlich sind, kann man sich die Zunahme der Oberfläche und des Umfangs der Mikrotröpfchen unter bestimmten Bedingungen als lawinenartig vorstellen. Hieraus folgt die Schlußfolgerung, daß allererste Ursache für die starke Geschwindigkeitszunahme des Tropfenzerfalls hinter der Stoßwelle die gestörte Unversehrtheit der Tropfen aufgrund der Rayleigh-Lamb-Taylor-Instabilität ist.

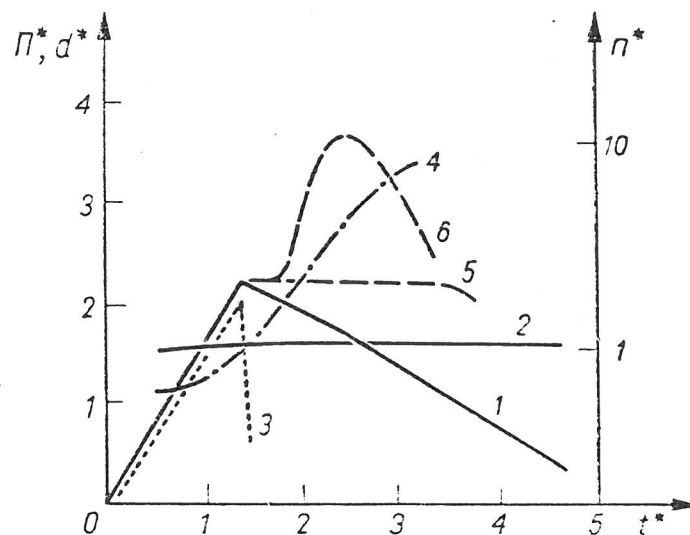


Abb. 4. Veränderung des Durchmessers  $d^*$ , des Umfanges  $\pi^*$  und der Tropfenzahl während des Zerfalls

- 1)  $d^*$  nach /32/, /43/; 2)  $n^*$  nach /32/, /43/; 3)  $d^*$  nach /30/, /33/, /37/, /41/; 4)  $\pi^*$  nach /30/, /33/, /37/, /41/; 5) und 6)  $\pi^*$  nach /30/, /33/, /37/, /41/

Die empirischen Ausdrücke zur Berechnung der Tropfenzerfallsgeschwindigkeit in den Arbeiten /35, 33/ geben am besten das Wesentliche des Zerfallsvorgangs wieder: die langsame Entwick-

lung des Vorgangs in der Zeit  $0 - t_1$ , Erreichen der maximalen Zerfallsgeschwindigkeit bis zur Zeit  $t_1 - 1,5 t_1$  und Abschluß des Tropfenzerfalls bis zur Zeit  $t \approx 5t_1$ .

Somit kann der Tropfenzerfall in einem bestimmten Abschnitt lawinenartig sein und, wenn das Gas auf eine Temperatur erwärmt ist, die für eine schnelle Selbstentzündung des entstandenen Gemisches ausreicht, dann führt der Tropfenzerfall zur Bildung von Herden für sekundäre Detonationen im Reaktionsbereich. Das Verhalten der sekundären Wellen, ausgehend von diesen Herden, bestimmt nun die hauptsächlichlichen Besonderheiten der heterogenen Detonation.

## 2. Struktur und Mechanismus der Ausbreitung der Detonationswellen

---

Nach der Art des Zerfalls, der Vermischung und Entzündung der Tropfen hinter der Detonationswellenfront sollte man erwarten dürfen, daß der Energieübertragungsmechanismus von der Reaktion zur führenden Stoßwelle und die Art der Strömung bei großen Tropfen stark durch die Reihenfolge der "lokalen" Detonationen bestimmt wird /40, 44/. Die Hypothese vom Detonationsmechanismus mit sekundären Detonationen wurde von Pierce entwickelt /11/.

Der erste Versuch zur Lösung des Problems einer Detonation mit einer Serie von  $m$  Detonationen, die in einer Zeiteinheit im Reaktionsbereich erfolgen, wurde offensichtlich von Čerepanov /44/ unternommen. Das von Čerepanov untersuchte theoretische Modell ist jedoch auf sehr starken Vereinfachungen aufgebaut und gibt nicht die Verbindung zwischen Detonationsgeschwindigkeit und den Parametern des 2-Phasensystems wieder.

Leider kann man mit keiner einzigen der vorhandenen Theorien bislang mehr oder weniger genau die Detonationsgeschwindigkeit in einem 2-Phasensystem mit ziemlich großen Tropfen berechnen. In den Arbeiten /7 - 11/ finden wir den traditionellen Ansatz zur Berechnung der Detonationsgeschwindigkeit in Röhren. Wie bei den Gasgemischen werden auch hier die Wärmeverluste an die Rohrwände berücksichtigt. Von diesem Umstand ausgehend wird die Größe der Wärmeentwicklung korrigiert. Ein wesentlicher Mangel dieser Theorie besteht darin, daß beim Übereinstimmen von Rechen- und Versuchswerten eine zu große Länge des Reaktionsbereichs vorgegeben werden muß. So wird für die Reaktionsbereichslänge in den Arbeiten /8/ und /11/  $l = Dt_x$  mit  $t_x \approx 10t_1$  angegeben, obwohl man weiß, daß der Zerfall bis zur Zeit  $5t_1$  vollkommen abgeschlossen ist und die Entzündung im Zeitpunkt  $t \approx t_1$  beginnt /28, 33/. Anscheinend hängt die Hauptursache für die unbefriedigende Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung mit den fehlenden Angaben über die Vollkommenheit der Verbrennung eines 2-Phasensystems im Reaktionsbereich zusammen.

Ungenügende Verbrennung des Brennstoffes oder Verbrennung hinter der Chapman-Jouguet-Ebene führt zu Energieverlusten, die um ein Vielfaches über den Verlusten aufgrund Wärmeübergangs an die Wände liegen. Beim Berechnen der Geschwindigkeit einer heterogenen Detonation in Rohren mit einem kerosinartigen Brennstoff oder flüssigem Sauerstoff muß man deshalb bislang noch auf einige empirische Relationen zurückgreifen, so z.B. auf die in Arbeit /11/ angegebene Gleichung für Tropfen mit  $d_0 > 290 \mu\text{m}$

$$D_2 = D_1 [1 + 30(d/r_R)^2 (\rho_f/\rho_1)^{0,5} C_H]^{-0,5}.$$

Für Aerosole mit einem Tropfendurchmesser von bis zu  $10 \mu\text{m}$  wird in Arbeit /24/ eine Abhängigkeit zur Berechnung der Detonationsgeschwindigkeit vom Rohrdurchmesser angegeben:

$$D_2 = D_1 - 0,44 r_R^{-1}.$$

In dieser Relation ist  $r_R$  in cm ausgedrückt. Sie ist gültig bis  $d_0 = r_R$ . Aufgrund des begrenzten Veränderungsbereiches des Rohrdurchmessers, in denen die Versuche durchgeführt wurden, ist es heute leider noch nicht möglich zu bestimmen, welcher Teil der Energieverluste mit der unvollständigen Verbrennung und der ungleichmäßigen Brennstoffverteilung im Reaktionsvolumen zusammenhängt und welcher Teil mit der Wärmeabgabe an die Wände. Eine experimentelle Überprüfung ist nur möglich in Versuchen mit Regelung der Wärmeabgabe an die Wände durch Steigerung oder Minderung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität sowohl der Rohrwände als auch des Gasgemisches selbst, und durch Veränderung der Rohrdurchmesser in größerem Umfang. Notwendig ist auch eine Klärung dessen, ob bei der heterogenen Detonation der Begriff Chapman-Jouguet-Ebene im traditionellen Sinne selbst noch sinnvoll ist, wie er in der Theorie der Gasdetonationen behandelt wird /11/. Es geht nämlich nicht darum, daß infolge der Druckwellen, die sich gegen die Strömung von den Zentren der sekundären Detonationen nach hinten fortpflanzen, eine Ausbreitung der Welle nur nach den gemittelten Werten stationär ist und außerdem die Gasströmung hinter der Welle sehr stark inhomogen ist (besonders bei großen Tropfen).

Die Hauptdaten zur heterogenen Detonation wurden an monodispersen Systemen ermittelt. Unter realen Bedingungen gibt es immer ein ganz bestimmtes Ensemble von Tropfengrößen. In Abhängigkeit der Zerfallzeit der Tropfen von deren Abmessungen sollte man verschiedene Eigenschaften der Detonationen in polydispersen und monodispersen Systemen erwarten dürfen. Die Entzündung der feinen Teilchen müßte die der größeren übertreffen. Nach den Angaben in /11/ fördert die Zugabe von feinen Teilchen etwas die Zunahme der Detonationsgeschwindigkeit. Weitergehende Untersuchungen der Detonation polydisperser Aerosole wurden bislang nicht durchgeführt.

Von großem praktischem Interesse ist die Frage nach dem Einfluß der inerten oder aktiven gasförmigen Zuschläge auf die heterogene Detonation. Nur in der Arbeit /11/ wird von Vorversuchen zur Untersuchung der Detonation in den Systemen Diäthylcyclohexan - Sauerstoff - Wasserstoff - Stickstoff, Diäthylcyclohexan - Sauerstoff - Wasserstoff bei Tropfen von  $750 \mu\text{m}$  Größe berichtet. Beim ersten System verändert sich die Detonationsgeschwindigkeit bei Zugabe von Stickstoff so, wie in Abb. 5 (Kurve 1) dargestellt. Man sieht, daß die Verdünnung mit Stickstoff nur bei einem Stickstoffgehalt von über 50 % anspricht. Eine derart komplizierte Abhängigkeit der Geschwindigkeit vom Verdünnen mit Stickstoff beweist, wie groß die Rolle der inhomogenen Verteilung von Brennstoff und Oxydator ist, und anscheinend auch, daß der Brennstoff auch in Gemischen mit Sauerstoffüberschuß nur unvollständig verbrannt wird. Man darf erwarten, daß die Geschwindigkeit der heterogenen Detonation sich bei Zugabe eines inerten Gases wie in Abb. 5 verändert. In einem Gas-Brennstoffgemisch nimmt durch das Verdünnen mit Stickstoff die Detonationsgeschwindigkeit nach der Linie 2 ab. Dieser ähnlich wäre anscheinend die Abhängigkeit der Detonationsgeschwindigkeit bei einer Tropfengröße bis  $20 \mu\text{m}$  (Kurve 3). Der Geschwindigkeitsabfall der heterogenen Detonation bei Gemischen mit Tropfen über  $750 \mu\text{m}$  wäre dann offensichtlich noch stärker.



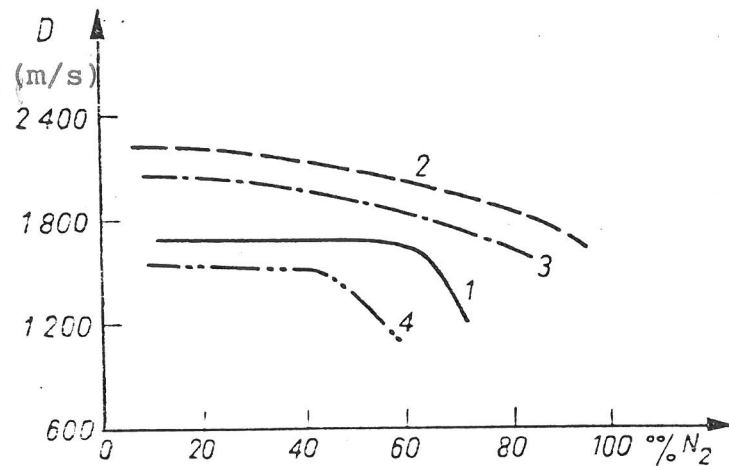


Abb. 5. Veränderung der Detonationsgeschwindigkeit bei Zugabe von Stickstoff

- 1)  $d_0 = 750 \mu\text{m}$ ,  $P_0 = 1 \text{ bar}$ ,  $\alpha = 1,1$  [11],
- 2) Gas; 3)  $d_0 = 1 - 20 \mu\text{m}$  (geschätzt);
- 4)  $d_0 = 1500 \mu\text{m}$  (geschätzt)

Ist im System ein aktives gasförmiges Lösungsmittel (Brennstoffgemisch) vorhanden, dann laufen die gasförmigen Reaktionen schneller ab als die Vorgänge Zerfall, Verdampfung und Vermischung. Deshalb hat die Detonation solange, als das Verhältnis der Sauerstoff- und Wassermole im System stöchiometrisch ist, alle Merkmale einer Gasdetonation. Bei Oxidatorüberschuß wirken sich die Tropfen beeinflussend aus. In Abb. 6 ist die Veränderung der Detonationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verdünnung des Gemisches mit Wasserstoff dargestellt:

$$X_{H_2} = p_{H_2} (p_{H_2} + p_{O_2})^{-1}$$

Die in /11/ enthaltenen Druckaufnehmeranzeigen beweisen, daß die Druckveränderungen in den Systemen Diäthylcyclohexan- $O_2$  und Diäthylcyclohexan- $O_2$ - $H_2$  bei verschiedenen  $X_{H_2}$  unterschiedlicher Art sind. Die gewonnenen Daten zwingen zu weiteren sorgfältigen Untersuchungen, wobei das Hauptaugenmerk darauf gerichtet sein sollte, die Unterschiede in der Struktur der Detonation in homogenen und heterogenen Systemen auszumachen

und den Druckimpuls bei verschiedenen Dispersitäten des Systems zu messen. Wie die Berechnungen der Detonationskennwerte von 2-Phasensystemen im Brennstoffverbrennungsbereich /25 - 27/ und eine einfache thermohydrodynamische Analyse zeigen, kann die 2-Phasendetonationswelle im Unterschied zur Gasetonation mit ihrer klassischen Struktur (chem. Peak mit konstantem Druck) und Druckabfall aufgrund der Verbrennungsreaktion) eine völlig andersartige Struktur besitzen. Wenn die Konzentration der flüssigen Phase gering ist, dann kommt das Druckprofil dem Druckprofil einer Gasetonation nahe, mit Ausnahme dessen, daß unter gewissen Bedingungen im Bereich des "chem. Peaks" eine geringfügige Druckzunahme infolge Abbremsens des Gases durch die Tropfen beobachtet werden kann. Mit zunehmendem Gehalt der flüssigen Phase nimmt das Druckverhältnis von Stoßfrontdruck zum Druck in der Chapman-Jouguet-Ebene ab und wird annähernd Eins, wo der Gewichtsanteil von Gas und Flüssigkeit in der Volumeneinheit gleich ist. Eine weitere Zunahme der Flüssigkeitskonzentration führt dazu, daß ungeachtet der Reaktion der Druck in der Welle nicht ab-, sondern zunimmt.

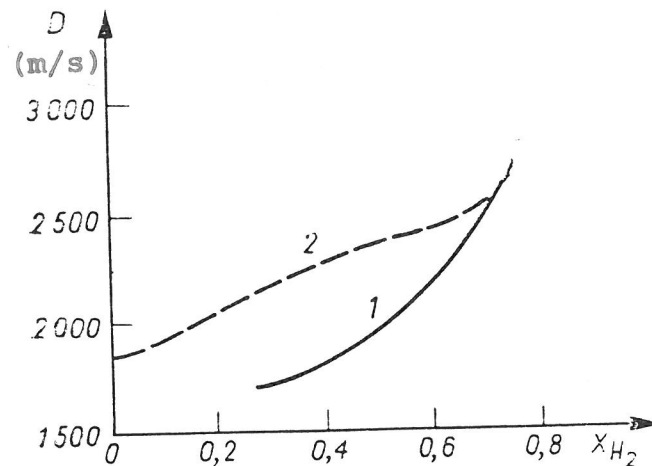


Abb. 6. Veränderung der Detonationsgeschwindigkeit im System Diäthylcyclohexan - Sauerstoff - Wasserstoff nach /11/  
1)  $O_2 + H_2$ ; 2)  $O_2 + H_2 + \text{Diäthylcyclohexan}$   
( $d_0 = 750 \mu\text{m}$ )

Die physikalische Ursache für diese Erscheinungen ist vollkommen klar, nämlich die Bildung einer gasförmigen Phase aus der Flüssigkeit und das Abbremsen der Strömung.

Die starke Verwendung von 2-Phasen-Brennstoffsystemen in Energieanlagen, die mit hohem Druck und hoher Temperatur arbeiten, veranlaßt uns zu einer genaueren Betrachtung der bereits oben genannten Besonderheit der heterogenen Detonation. In der Arbeit /45/ wurde z.B. die Möglichkeit aufgezeigt, daß sich Stoßwellen- und Detonationsadiabaten schneiden und der Druck hinter der Detonationswellenfront kontinuierlich zunimmt, wenn der Druck an der Wellenfront insgesamt  $p_2/p_1 \approx 8$  bei zunehmender Temperatur abfällt. Die Untersuchung der besagten Fälle ist sowohl von praktischem als auch von theoretischem Interesse.

Es bedarf noch einiger Bemerkungen zur Stabilität der heterogenen Detonation, die solche wichtigen Detonationseigenschaften ausmacht wie etwa Ausbreitungsgrenzen und gasdynamische Struktur (Möglichkeit von Spinwellen). Die Möglichkeit der Gasdetonation wird stark bestimmt durch die exponentielle Abhängigkeit der Geschwindigkeit der chemischen Reaktionen und der Entzündungsverzögerung von der Temperatur. Die Versuchsergebnisse über die Entzündung der Tropfen in Stoßwellen zeigen, daß die Verzögerung der Entzündung von Kohlenwasserstofftropfen bei einer Temperatur von über 1 300 K durch die Zeit bestimmt wird, wann der intensive Tropfenzerfall beginnt, die wiederum allein von der Wellengeschwindigkeit abhängt /28/. Die Länge des Reaktionsbereichs kommt größtmäßig dem Wert

$$l_1 \sim D_2 t_1 \approx d \frac{\rho_1}{\rho_1 - \rho_0} \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_1}}$$

nahe. Von der Geschwindigkeit der Stoßwelle hängt nur die Gasdichte hinter der Stoßfront ab. Dann bestimmt sich die Veränderung der Dichten an der Stoßfront mit der Machschen Zahl durch die Funktion

$$\psi = \frac{d(\rho_1/\rho_0)}{dM_1} = \frac{2(\gamma+1)M_1}{2+(\gamma-1)M_1^2} - \frac{(\gamma+1)M_1^3}{[2+(\gamma-1)M_1^2]^2}$$

Die Veränderung der Funktion  $\psi$  mit der Machschen Zahl ist in Abb. 7 dargestellt. Daraus geht hervor, daß  $\psi$  bei  $M \geq 4$  nur sehr wenig von der Machschen Zahl abhängt. Dies bedeutet, daß auch die Länge des Reaktionsbereichs bei  $M \geq 4$  nur sehr wenig von  $M$  abhängt. Eine Analyse der Detonationsstabilität eines 2-Phasensystems sollte unter Berücksichtigung aller Vorgänge der Umwandlung von flüssigem Brennstoff in Reaktionsprodukte (Zerfall, Verdampfung, Vermischung, chemische Kinetik) durchgeführt werden. Abstraktes Vorgehen ohne einen konkreten Mechanismus oder eine Linearisierung des Problemes /18/ können offensichtlich nicht zu richtigen Schlußfolgerungen über die Grenzbedingungen der Existenz einer Detonation in 2-Phasensystemen führen.

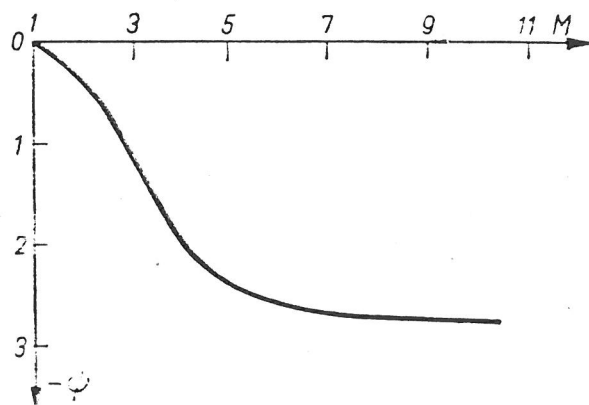


Abb. 7. Veränderung der Größe  $d(\rho_1/\rho_0)/dM_1$  in Abhängigkeit von der Machschen Zahl

Auch wenn nur ganz allgemein, so denn aber verständlich und völlig ausreichend untersucht sind somit die in Detonationswellen in flüssigen Sprays vorstatten gehenden Vorgänge, um mit ihnen das physikalische Wellenmodell zu konstruieren, unabhängig davon, daß die quantitativen Charakteristika noch nicht ausreichend genau berechnet werden können und außerdem die Versuchsangaben zur vergleichweisen Überprüfung mit den Rechenergebnissen und zum Entwurf von noch genaueren Modellen noch nicht ausreichend sind.

Es steht anscheinend außer Zweifel, daß die mit der Zweiphasigkeit zusammenhängenden Charakteristiken mit zunehmender Tropfengröße und/oder Konzentration der flüssigen Phase immer deutlicher werden. Zunehmende Flüssigkeitskonzentration führt zu starker Veränderung des Druckbilds in der Welle, und zunehmender Abstand zwischen den Tropfen zu inhomogener Verteilung des Brennstoffgemisches, lokalen Explosionen, unvollständiger Verbrennung und geringerer Wellengeschwindigkeit. Dies gilt insbesondere bei Tropfen über 10  $\mu$ m, deren Zerfallsvorgang wesentlich ist bei der Umformung von Brennstoff in Verbrennungsprodukte. Dabei ist wichtig darauf hinzuweisen, daß der Zerfall anfangs ziemlich langsam in starken Wellen abläuft (Abreißen der Flüssigkeitsgrenzschicht) und danach schnell (infolge Verformung und hydrodynamischer Instabilität des Tropfens im Gesamten). Grundsätzlich kann man die Abmessungen der sekundären Tropfen, die sich nach der Zerstörung der ersten Tropfen bilden, (und damit auch die Geschwindigkeit der Verbrennung oder Verdampfung) anhand der vorhandenen Daten zum Tropfenzerfall in Stoßwellen bestimmen.

Zum vollständigen Verständnis der Natur der Stoßwellen in Flüssigkeitssprays wäre in erster Linie die Durchführung von Untersuchungen über den Einfluß verschiedener Relationen zwischen den charakteristischen Entzündungszeiten der Dampfphase und dem Tropfenzerfall auf die Gesamteigenschaften der Welle zweckmäßig. Äußerst dürftig (wenn überhaupt vorhanden) sind die Versuchsangaben zu den Grenzbereichen für das Auftreten von Detonationen (insbesondere in stark angereicherten Gemischen) und zur gasdynamischen Struktur, d.h. dazu, wie die Instabilität einer kleinen Welle in diesem Fall erscheint, aber auch zu den Charakteristiken der Übergangsvorgänge von Verbrennung zu Detonation und die zur Einleitung von Kugelwellen.

All dies beweist, daß die Untersuchungen zu den Detonationsvorgängen in 2-Phasensystemen eher am Anfang stehen und nicht etwa auf der Mitte oder bereits am Ende des Weges zu einem völligen Verständnis dieser Erscheinung.

Literatur<sup>1)</sup>

1. Dabora, E.K., Weinberger, L.P.: Present status of detonations in two-phase systems.  
In: Acta astronautica. Oxford, 1(1974), Nr 3/4, S. 361 bis 372.
2. Webber, W.T.: The effects of gas motion upon heterogeneous combustion. Natural convection, steady forced convection, standing acoustic waves, and shock waves final summary report.  
WADC (Wright Air Development Center. Air research and development command. United States Air Force. Wright-Patterson Air Force Base). Ohio. Technical report 59-50 (1959), 88 Seiten.
3. Webber, W.T.: Spray combustion in the presence of a travelling wave.  
In: 8th (International) Symposium on combustion at the California Institute of Technology, Pasadena, California, 28.08. - 3.09.1960. Baltimore: 1962, S. 1129 - 1140.
4. Cramer, F.B.: The onset of detonation in a droplet combustion field.  
In: 9th (International) Symposium on combustion at Cornell University, Ithaca, New York, 27.08. - 1.09.1962. New York/London: 1963, S. 482 - 487.
5. Williams, F.A.: Structure of detonations in dilute sprays.  
In: Physics of fluids. New York, 4 (1961), Nr 11, S. 1434 bis 1443.
6. Williams, F.A.: Detonations in dilute sprays.  
In: Progress in astronautics and rocketry. New York, 6 (1962), S. 99 - 114.
7. Dabora, E.K., Ragland, K.W., Nicholls, J.A.: A study of heterogeneous detonations.  
In: AIAA paper. American Institute of Aeronautics and Astronautics. New York, 1968, Nr 66-109, 18 Seiten + Abb.
8. Ragland, K.W., Dabora, E.K., Nicholls, J.A.: Observed structure of spray detonations.  
In: Physics of fluids. New York, 11 (1968), Nr 11, S. 2377 bis 2388.
9. Nicholls, J.A.: Two phase detonation studies related to rocket instability.  
(National Aeronautics and Space Administration. NASA Lewis Research Center). NASA CR-72668 (1969), 35 Seiten.
10. Dabora, E.K., Ragland, K.W., Nicholls, J.A.: Drop-size effects in spray detonations.  
In: 12th International symposium on combustion at the University of Poitiers, 1968. Pittsburg: 1969, S. 19 - 26.

---

1) überarbeitet vom Übers.

11. Pierce, Todd Huntley  
Experimental and theoretical study of the structure of two-phase detonation in sprays.  
Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (Aerospace Engineering) in the University of Michigan, 1972, 302 S.
12. Kauffmann, C.W., Nicholls, J.A.: Shock wave ignition of liquid drops.  
In: AIAA journal. American Institute of Aeronautics and Astronautics). New York, 9 (1971), Nr 7, S. 880 - 885.
13. Kauffmann, C.W., Nicholls, J.A., Olzmann, K.A.: The interaction of an incident shock wave with liquid fuel drops.  
In: Combustion science and technology. New York, 3 (1971), Nr 4, S. 165 - 178.
14. Dabora, E.K., Ragland, K.W., Nicholls, J.A.: A study of heterogeneous detonations.  
In: Astronautica acta. Oxford, 1 (1966), Nr 12, S. 9 - 16.
15. Wójcicki, S.: Mechanizm rozprzestrzeniania się detonacji w ośrodku dwufazowym.  
In: Archiwum procesów spalania/Archives of combustion processes. Warszawa, 1 (1970), Nr 2, S. 191 - 205.  
/The propagation process of detonation in a two-phase medium; poln./
16. Nicholls, J.A., Miyajima: Interaction of shock wave with a burning drop.  
In: Archiwum procesów spalania/Archives of combustion processes. Warszawa, 4 (1973), Nr 4, S. 363 - 375.
17. Wierzba, Andrzej, Wójcicki, Stanisław: Analiza procesu samozapłonu kropeł paliwa za odbitą falą uderzeniową.  
In: Archiwum procesów spalania/Archives of combustion processes. Warszawa, 3 (1972), Nr 4, S. 419 - 427.  
/Investigation of the self-ignition process of fuel droplets behind a reflected shock wave; poln./
18. Aslanov, Sergej K.: Gorenje dvuchfaznyh sistem.  
In: Archiwum procesów spalania/Archives of combustion processes. Warszawa, 3 (1972), Nr 2, S. 165 - 179.  
Engl. Übers.: Combustion of two-phase mixtures. - Übersetzungsstelle der Technischen Informationsbibliothek Hannover, Nr AD/A-005 067/4ST, 21 Seiten.
19. siehe 9.
20. Nicholls, J.A.: Two phase detonation as related to rocket motor combustion instability.  
(National Aeronautics and Space Administration. NASA Lewis Research Center). NASA CR-72532 (1969), 23 Seiten.
21. Nicholls, J.A., Dabora, E.K., Ragland, K.W.: A study of two phase detonation as it relates to rocket motor combustion instability.  
NASA (National Aeronautics and Space Administration) Contractor Report. Washington, D.C., NASA-CR-272 (1965), 15 Seiten.

22. Dabora, E.K., Ragland, K.W., Ranger, A.A., Nicholls, J.A.: Detonations in two phase media and drop shattering studies. (National Aeronautics and Space Administration. NASA Lewis Research Center). NASA CR-72421 (1968), 115 Seiten.
23. Вежба А.: *О существовании минимального дробления капель, в потоке газообразного окислителя, необходимом для возникновения детонационного горения.* Физика горения и взрыва 10 (1974) № 5, стр. 710—717
- Vežba /Wierzba/, A.: O sušćestvovanii minimal'nogo droblenija kapel' v potoke gazoobraznogo okislitelja, neobchodimom dlja vznikovenija detonacionnogo gorenija.  
In: *Fizika gorenija i vzryva.* Moskva, 10 (1974), Nr 5, S. 710 - 717.  
Engl. Übers.: *Existence of a minimal degree of atomization of the drops in a flow of gaseous oxidizer, required for the appearance of detonation combustion.*  
In: *Combustion, explosion, and shock waves.* New York, 10 (1974), Nr 5, S. 631 - 637.
24. Bowen, J.R., Ragland, K.W., Steffes, F.J., Loflin, T.G.: Heterogeneous detonation supported by fuel fogs or films.  
In: *13th International symposium on combustion at the university of Utah 1970.* Pittsburg, Pa.: 1971, S. 1131 bis 1139.
25. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Подгребенков А. Л.: *О деформации капель в зоне реакции при детонации двухфазных систем.* Журнал прикладной механики и технической физики 5 (1970), стр. 39—44
- Borisov, A.A., Gel'fand, B.E., Gubin, S.A., Kogarko, S.M., Podgrebenkov, A.L.: O deformacii kapel' v zone reakcii pri geterogennoj detonacii.  
In: *Žurnal prikladnoj mehaniki i tehničeskoj fiziki.* Novosibirsk, 11 (1970), Nr 5, S. 39 - 44.  
Engl. Übers.: *Deformation of drops in the reaction zone of heterogeneous detonation.*  
In: *Journal of applied mechanics and technical physics.* New York, 11 (1970), Nr 5, S. 741 - 746.
26. Borisov, A.A., Gel'fand, B.E., Gubin, S.A., Kogarko, S.M.: The onset of detonation in two-phase (liquid-gas) mixtures.  
In: *13th International symposium on combustion at the university of Utah 1970.* Pittsburg, Pa., 1971, S. 1171 bis 1177.
27. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Подгребенков А. Л.: *Зона реакции при детонации двухфазных систем.* Физика горения и взрыва (1970) № 3, стр. 35—43
- Borisov, A.A., Gel'fand, B.E., Gubin, S.A., Kogarko, S.M., Podgrebenkov, A.L.: Zona reakcii pri detonacii dvuchfaznyh sistem.  
In: *Fizika gorenija i vzryva.* Moskva, 6 (1970), Nr 3, S. 374 - 385.  
Engl. Übers.: *Detonation reaction zone in two-phase mixtures.*  
In: *Combustion, explosion, and shock waves.* New York, 6 (1970), Nr 3, S. 327 - 336.



28. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Миронов В. Н.: *Динамика воспламенения газо-жидкостной горючей смеси за фронтом слабой ударной волны. Горение и взрыв.* Москва 1972 Наука, стр. 153—157  
Gel'fand, B.E., Gubin, S.A., Kogarko, S.M., Mironov, V.N.:  
Dinamika vosplamnenija gazo-židkostnoj gorjučej smesi za frontom slaboj udarnoj volny.  
In: *Gorenje i vzryv.* Moskva: Verlag "Nauka", 1972, S. 153 bis 157.  
/Entzündungsdynamik eines Gas-Flüssigkeits-Brennstoffgemisches hinter einer schwachen Stoßwellenfront; russ./
29. Borisov, Anatoli A., Gelfand, Boris E., Gubin, Sergej A., Kogarko, Stanislav M., Podgrebenkov, Anatoli L.: The reaction zone of two-phase detonations.  
In: *Astronautica acta.* Oxford, 15 (1970), Nr 4, S. 411 bis 419.
30. Engel, Olive G.: Fragmentation of water drops in the zone behind an air shock.  
In: *Journal of research. National bureau of standards.* Washington, D.C., 60 (1958), Nr 3, S. 245 - 280.
31. Hanson, A.R., Domich, E.G., Adams, H.S.: Shock tube investigation of the breakup of drops by air blasts.  
In: *Physics of fluids.* New York, 6 (1963), Nr 10, S. 1070 bis 1080.
32. Ranger, A.A., Nicholls, J.A.: Aerodynamic shattering of liquid drops.  
In: *AIAA journal. American Institute of Aeronautics and Astronautics.* New York, 7 (1969), Nr 2, S. 285 - 290.
33. Reinecke, W.G., Waldman, G.D.: An investigation of water-drop disintegration airstreams behind strong shock waves.  
In: *Proceedings of the 3rd International conference on rain erosion and associated phenomena.* Elvetham Hall, 11 - 13.08. 1970. Hampshire: 1970, S. 629 - 668.
34. Simpkins, P.G.: Droplet response to accelerations induced by weak shock waves.  
In: *8th International shock tube symposium. Imperial College London, 5. - 8.7. 1971. - Shock Tube research. London, 1971, paper Nr 64, 11 Seiten.*
35. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М.: *Динамика разрушения капель жидкости в газовом потоке.* Доклады Академии Наук СССР 198 (1971) № 1, стр. 71—73  
Kogarko, S.M., Gel'fand, B.E., Gubin, S.A., Borisov, A.A.:  
Dinamika razrušeniya kapel' židkosteju v gazovom potoke.  
In: *Doklady. Akademija nauk SSSR.* Moskva, 198 (1971), Nr 1, S. 71 - 73.  
Engl. Übers.: Dynamics of the breakdown of liquid droplets in a gas flow.  
In: *Soviet physics. Doklady.* New York, 16 (1971), Nr 5, S. 358 - 360.
36. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Комар С. П.: *Особенности разрушения капель вязкой жидкости в ударных волнах.* Инженерно-физический журнал XXV (1973) № 3, стр. 467—470

- Gel'fand, B.E., Gubin, S.A., Kogarko, S.M., Komar, S.P.: Osobennosti razrušenija kapel' vjazkoj židkosti v udarnych volnakh.  
In: Inženero-fizičeskij žurnal. Minsk, 25 (1973), Nr 3, S. 467 - 470.  
Engl. Übers.: Singularities of the breakup of viscous liquid droplets in shock waves.  
In: Journal of engineering physics. New York, 25 (1973), Nr 3, S. 1140 - 1142.
37. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М.: *Разновидности разрушения капель жидкости в ударных волнах и их характеристики.* Инженерно-физический журнал XXVII (1974) № 1, стр. 119—126  
Gel'fand, B.E., Gubin, S.A., Kogarko, S.M.: Raznovidnosti razrušenija kapel' židkosti v udarnych volnakh i ich charakteristiki.  
In: Inženero-fizičeskij žurnal. Minsk, 27 (1974), Nr 1, S. 119 - 126.  
Engl. Übers.: Various forms of drop fractionation in shock waves and their special characteristics.  
In: Journal of engineering physics. New York, 27 (1974), Nr 1, S. 877 - 882.
38. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М.: *Разрушение капель жидкости в потоке за ударными волнами с треугольным профилем изменения скорости газа.* Механика жидкости и газа (1973) № 5, стр. 54—60  
Gel'fand, B.E., Gubin, S.A., Kogarko, S.M., Komar, S.P.: Razrušenje kapel' židkosti v potoke za udarnymi volnami s treugol'nym profilem izmenenija skorosti gaza.  
In: Izvestija. Akademija nauk SSSR. Mechanika židkosti i gaza. Moskva, 1973, Nr 5, S. 54 - 60.  
Engl. Übers.: Breakup of liquid drops in a flow behind shock waves with a triangular gas-velocity profile.  
In: Fluid dynamics. New York, 1973, Nr 5, S. 724 - 728.
39. STEFFES F. G., BOWEN J. R.: *Decane aerosol detonation.* 21 Meeting of Amer. Phys. Soc. 1968 nicht zu ermitteln, dafür:  
Steffes, F.J.: Determination of detonation wave velocities.  
In: Review of scientific instruments. Lancaster, P.A., 39 (1968), Nr 8, S. 1092 - 1093.
40. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Подгребенков А. Л.: *Механизм образования волны сжатия за фронтом слабой ударной волны, распространяющейся по горючей двухфазной смеси.* Доклады Академии Наук СССР 190 (1970) № 3, стр. 621—624  
Borisov, A.A., Gel'fand, B.E., Gubin, S.A., Kogarko, S.M., Podgrebenkov, A.L.: Mechanizm obrazovanija volny szatija za frontom slaboj udarnoj volny, rasprostranjajuščesja po gorjučej dvuchfaznoj smesi.  
In: Doklady. Akademija nauk SSSR. Moskva, 190 (1970), Nr 3, S. 621 - 624.  
Engl. Übers.: Mechanism of formation of a compression wave behind the front of a weak shock wave propagated through a combustible two-phase mixture.  
In: Doklady physical chemistry. New York, 190 (1970), Nr 1/3, S. 58 - 60.

41. Reinecke, W.G., Waldman, G.D.: Shock layer shattering of cloud drops in reentry flight.  
AIAA paper. American Institute of Aeronautics and Astronautics. New York, 1975, Nr 75-152, 22 Seiten.
42. Priem, Richard J., Heidman, Markus F.: Propellant vaporization as a design criterion for rocket-engine combustion chambers.  
Technical report. National Aeronautics and Space Administration. Washington, D.C., 1960, R-67, 55 Seiten.
43. Kauffmann, C.W., Wierzba, A., Nicholls, J.A.: Fuel droplet combustion.  
In: Archiwum procesów spalania/Archives of combustion processes. Warszawa, 5 (1974), Nr 2, S. 131 - 137.
44. Черепанов Г. П.: Теория детонации гетерогенных систем. Журн. прикладной математики и технической физики (1965) № 4, стр. 117  
Čerepanov, G.P.: K teorii detonacii v geterogennyh sistemach.  
In: Žurnal prikladnoj mehaniki i techniĉeskoj fiziki. Novosibirsk, 1965, Nr 4, S. 163 - 164.  
Engl. Übers.: Theory of detonation in heterogeneous systems.  
In: Journal of applied mechanics and technical physics. New York, 1965, Nr 4, S. 111 - 112.
45. Shen, Peter I-wu, Adamson, T.C.: Theoretical analysis of a rotating two-phase detonation in liquid rocket motors.  
In: Astronautica acta. Oxford, 17 (1972), Nr 4/5, S. 715 bis 728.

Redaktionseingang  
Juni 1975

Stuttgart, den 3. Februar 1987

übersetzt von

*Ottmar Pertschi*  
(Ottmar Pertschi)  
Dipl.-Übersetzer