

# DIE UMSCHAU

Forschung und Entwicklung – Schlüsseltechnologien und Innovationen

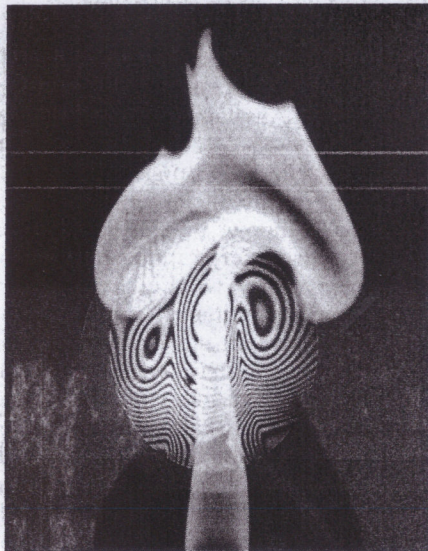
Die Erforschung von Schadenfeuern

## Ordnung im Flammenchaos



*Unbegrenzt Leben im Universum?  
Die Zukunft des Universums*

#### Zum Titelbild



#### Ordnung im Flammenchaos

Schadenfeuer (Wald- und Gebäudebrände, Tankbrände) sind erstaunlicherweise wenig erforscht. Die hier beschriebene Untersuchung von Schadenfeuern dient der Sicherheit von Chemie-Anlagen. Das Bild zeigt die kohärente Synchronstruktur einer Tankflamme des flüssigen Brennstoffs n-Hexan. Die Synchronstrukturen enthalten sowohl die momentanen Strahldichtestrukturen (z. B. leuchtende) Flammenballen als auch die momentanen Dichtestrukturen (dunkle und helle Interferenzstreifen) der Flamme. Die Beleuchtungszeit beträgt  $1/2500$  s, der Tankdurchmesser 4,6 cm.

# Ordnung im Flammenchaos

*Erforschung von Schadenfeuern dient der Sicherheit von Chemie-Anlagen*

Erstaunlicherweise sind die in der Natur am häufigsten vorkommenden und auch sicherheitstechnisch bedeutsamen Feuer vom Typ eines Schadenfeuers, das z. B. bei Wald- und Gebäudebränden, bei Tankbränden sowie bei Tankerbränden auftritt, bisher wenig erforscht. Im chaotischen Flammenfeld derartiger Schadenfeuer existiert überraschenderweise eine Vielzahl geordneter Strukturen von relativ großer Stabilität. Über die Sichtbarmachung und vielfältigen Eigenschaften geordneter Strukturen in Schadenfeuern wird am Beispiel von Tankflammen berichtet.

Im Chaos von Tankflammen existieren geordnete Strukturen, die recht stabil sind und eine relativ große Lebensdauer besitzen. Die große praktische Bedeutung der geordneten Strukturen besteht darin, daß sie die Verbrennungsintensität reduzieren und zu einer starken Erhöhung der Schadstoffbildung (z. B. Ruß, Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffoxide) führen. Darüber hinaus spielen diese geordneten Strukturen nicht allein bei Schadenfeuern eine wichtige Rolle, sondern sind auch von besonderer Bedeutung bei der technischen Nutzung von Verbrennungsvorgängen zur Energieerzeugung (z. B. Brennerflammen in Kraftwerken) einschließlich der motorischen Verbrennung. Über die spontane Bildung und die Eigenschaften derartiger geordneter Strukturen in Flammen ist noch wenig bekannt [1, 2]. Vor wenigen Jahren hat sich eine interdisziplinäre Forschungsrichtung zu entwickeln begonnen, die als Synergetik [3] bezeichnet wird und sich mit geordneten Strukturen in physikalisch-chemischen, biologischen und soziologischen Systemen beschäftigt.

In Tankflammen kommen drei Klassen geordneter Strukturen vor. Die erste Strukturklasse bilden die Langzeit-

Äquidensitenstrukturen, die wie folgt sichtbar gemacht werden können. Alle Tankflammen emittieren neben der unsichtbaren Infrarot-Wärmestrahlung zusätzlich eine sichtbare Strahlung. Diese sichtbare Lichtemission (pro Flächen- und Raumwinkleinheit als Strahldichte bezeichnet) der Tankflammen wird bei einer Belichtungszeit von 90 s unter Verwendung entsprechender Neutraldichtefelder, fotografisch registriert. Das bei dieser fotografischen Langzeit-Aufnahme einer Tankflamme entstehende

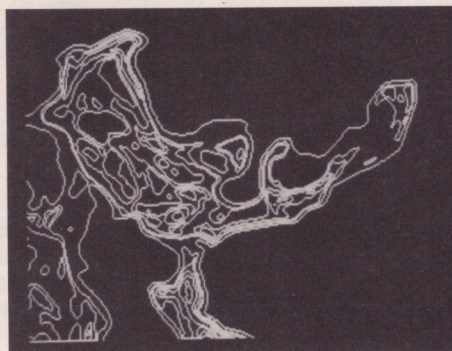
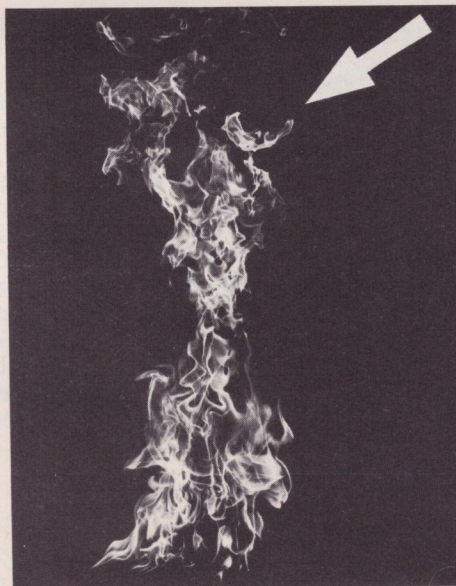


Bild 1: Kohärente Strahldichtestrukturen (oben) und kohärente Äquidensitenstrukturen (unten) einer Tankflamme des flüssigen Brennstoffs n-Hexan bei einem Tankdurchmesser von 20 cm. Bei der Groß-Tankflamme (Tankdurchmesser von 18 m, Belichtungszeit 1/125 s) sind Flammenballen und Rußballen zu erkennen. (Der DFVLR, Köln, danken wir für die Ermöglichung dieser Aufnahme.)

Schwarzweißnegativ wird Langzeit-Fotogramm genannt. Zur Sichtbarmachung geordneter Langzeit-Strukturen wird das Langzeit-Fotogramm auf einen Leuchtkasten gelegt und von einer TV-Kamera abgetastet, deren Ausgangssignale in ein digitales Bildauswertesystem gelangen. Dort werden Punkte gleicher Schwärzung des Fotogramms zu Linien (Äquidensiten) verbunden und jeder Äquidensite wird, zur besseren Unterscheidbarkeit benachbarter Äquidensiten, eine bestimmte Farbe zugeordnet. Auf einem Farbmonitor wird dann eine wählbare Anzahl farbiger Äquidensitenlinien sichtbar, die in ihrer Gesamtheit die Langzeit-Äquidensitenstruktur einer Tankflamme darstellen.

In den allgemeinen symmetrischen Äquidensitenstrukturen von Tankflammen ist zu erkennen, daß, im unteren Flammenbereich über der Brennstoffoberfläche beginnend, zwischen einer „Halsstruktur“ und einer „Fahnenstruktur“ unterschieden werden kann. Eine genauere Untersuchung hat ergeben, daß die Halsstruktur für den laminar brennenden Flammenbereich und die Fahnenstruktur für den turbulent brennenden Flammenbereich charakteristisch ist. Eine Änderung des Tankdurchmessers bzw. des Brennstoffs führt allein zu einem anderen geometrischen Anteil von Fahnen- und Halsstruktur.

Die quantitative Bedeutung der Langzeit-Äquidensitenstrukturen besteht zunächst darin, daß sie nicht allein den Verlauf der sichtbaren Lichtstrahlung (sichtbare Strahldichte), sondern ebenso den Verlauf der unsichtbaren Wärmestrahlung (infrarote Strahldichte) einer Tankflamme mit guter Näherung wiedergeben. Die Strahldichte wiederum hängt ab von den Flammentemperaturen, den Konzentrationen vor allem an Ruß, Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid in einer Art, die bisher nur im Bereich der laminaren Halsstruktur berechenbar ist.

Als sicherheitstechnische Anwendung lassen sich aus den Langzeit-Äquidensitenstrukturen jeweils die zeitlichen Mittelwerte der Flammenhöhe, der Flammenbreite und der wahren Strahlungsfläche ermitteln.

Die zweite Strukturklasse bilden die momentanen Strahldichtestrukturen (Bild 1) einer Tankflamme, die wie folgt sichtbar gemacht werden. Wird die Tankflamme mit einer sehr kurzen Belichtungszeit von  $\approx 1/1000$  s oder mit einer Hochgeschwindigkeits-Filmkamera mit  $\approx 1000$  Bildern/s aufgenommen, dann ist zu erkennen, daß das Flammenfeld sehr chaotisch aussieht, aber den-

noch zusammenhängende (kohärente) Kurzzeit-Strukturen enthält, die als kohärente Strahldichtestrukturen bezeichnet werden.

Die kohärenten Strahldichtestrukturen haben sowohl typisch periodische Eigenschaften, wie beispielsweise:

- Wellenbewegung der leuchtenden Flammenkontur (12,2 Hz),
- Bildung des Flammenpilzes (12,5 Hz)
- Bildung rotierender Flammenballen (bis 1,7 Hz ab Durchmesser = 50 cm)
- Aufsteigen von Rußwolken (12 Hz; aus Schattenfilmen) als auch typisch statistische Eigenschaften, wie beispielsweise:
- Translationsgeschwindigkeiten (bis 2,5 m/s)
- Schwankungsgeschwindigkeiten (bis 1,2 m/s)
- Häufigkeitsverteilungen der Längen und Breiten der Flammenballen
- Wachstums- und Zerfallsgeschwindigkeiten (bis 1,5 m/s)
- Häufigkeitsverteilungen von Lebensdauern der Flammenballen ( $\approx 130$  ms)
- Abtrennvorgänge der Flammenballen von der Hauptflamme
- Rotationsgeschwindigkeiten der Flammenballen (größer 3 m/s, ab Durchmesser = 20 cm).

Die Zahlenwerte in Klammern beziehen sich auf eine n-Hexan-Tankflamme mit einem Durchmesser von 4,6 cm, wenn nichts anderes angegeben ist.

Analog zu den Langzeit-Strahldichtestrukturen lassen sich auch die kohärenten Kurzzeit-Strahldichtestrukturen in Linien konstanter Strahldichte transformieren. Dadurch entstehen kohärente Äquidensitenstrukturen, die in dem unteren

Teilbild von *Bild 1* dargestellt sind. Es ist zu erkennen, daß die leuchtenden Flammenballen durch etwa konzentrische Äquidensitenringe weiter strukturiert sind. Solche Äquidensitenringe werden als Äquidensitenballen bezeichnet.

Eine dritte Strukturklasse stellen die kohärenten Synchronstrukturen (*Titelbild*) dar. Die kontinuierliche Beobachtung von Synchronstrukturen erfolgt mit einem holografischen Interferometer (*Bild 2*). Wie aus dem *Titelbild* hervorgeht, besteht die kohärente Dichtestruktur einer Tankflamme aus schwarzen und hellen Interferenzstreifen, entlang denen die Dichte einer Flamme näherungsweise konstant ist. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß es bisher kein Meßverfahren gibt, die Dichte einer Flamme direkt zu messen. Die bisher gefundenen Dichtestrukturen lassen sich in große und kleine Strukturen einteilen und haben eine Reihe periodischer und quasiperiodischer (bi- und triperiodische) Eigenschaften, wie beispielsweise:

- schraubenförmige Wellenbewegungen der thermischen Grenzschicht (11,5 Hz)
- Aufsteigen der Dichteballen (11,2 Hz)
- Aufsteigen leuchtender Flammenzonen (11,2 Hz)
- Bildung von Dichteballen-Konfigurationen im Flammenhals (2,9 Hz)
- Bildung von Dichteballen (im Höhenbereich 8 bis 16 cm: triperiodisch, bei 40 Hz, 105 Hz und 335 Hz)

● Pulsationen von Dichteballen als Quellen oder Senken (bi- und triperiodisch bis 1000 Hz), als auch eine Vielzahl statistischer Eigenschaften, wie beispielsweise:

- Translationsgeschwindigkeiten der Dichteballen (bis 1 m/s)
- Schwankungsgeschwindigkeiten der Dichteballen (bis 0,5 m/s)
- Häufigkeitsverteilungen der Längen und Breiten der Dichteballen
- Wachstums- und Zerfallsgeschwindigkeiten (bis 0,07 m/s)
- Häufigkeitsverteilungen von Lebensdauern der Dichteballen (größer 40 ms)
- Paarung von Dichteballen
- Entstehungsvorgänge von Dichteballen
- Momentane Flammendichten und -temperaturen (minimale Dichte: 0,16 kg/m<sup>3</sup>; maximale Flammentemperaturen bis 2000 °C)
- Temperaturschwankungen (bis 680 °C).

Die Zahlenwerte in Klammern beziehen sich wieder auf eine n-Hexan-Tankflamme mit einem Tankdurchmesser von 4,6 cm. Mit der Entdeckung geordneter Strukturen in Tankflammen erscheint es möglich, das Chaos von Flammen als Wechselspiel zwischen Strukturen bestimmter Eigenschaften zu beschreiben. Der nächste, sicher nicht einfache Schritt besteht nun darin, die gefundenen Strukturen und ihre Eigenschaften aus physikalisch-chemischen Grundlagen heraus zu berechnen.

Neben der grundlagenwissenschaftlichen Erforschung der Dynamik geordneter Strukturen sollen als sicherheitstechnische Anwendung die Auswirkungen solcher Strukturen auf die intensive Wärmeabstrahlung von Schadenfeuern in ihre Umgebung untersucht werden.

Dr. A. Kettler, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut, danken wir für die Transformation der Fotogramme in Äquidensiten.

Der Stiftung Volkswagenwerk, Hannover, sowie dem Fonds der Chemischen Industrie, Frankfurt, danken wir für die finanzielle Unterstützung.

**Prof. Dr. A. Schönbacher**  
**Prof. Dr. W. Brötz**

#### Literatur:

- [1] Brötz, W., Schönbacher, A., Banhardt, V., Schieß, N.: Periodische und statistische Eigenschaften kohärenter Kurzzeit-Strukturen in Tankflammen, Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 87, 1983, S. 997-1004. [2] Schönbacher, A.: Wärme, Stoff- und Impulstransportvorgänge unter besonderer Berücksichtigung kohärenter Strukturen in Tankflammen organischer Flüssigkeiten, Fortschr.-Ber. VDI-Z., Reihe 6, 1981, Nr. 83. [3] Haken, H.: Synergetik. Springer-Verlag, Berlin 1982.

Prof. Dr. A. Schönbacher und Prof. Dr. W. Brötz, 1. Institut für Technische Chemie der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 55, 7000 Stuttgart 80, Telefon 07 11/6 85-40 60.

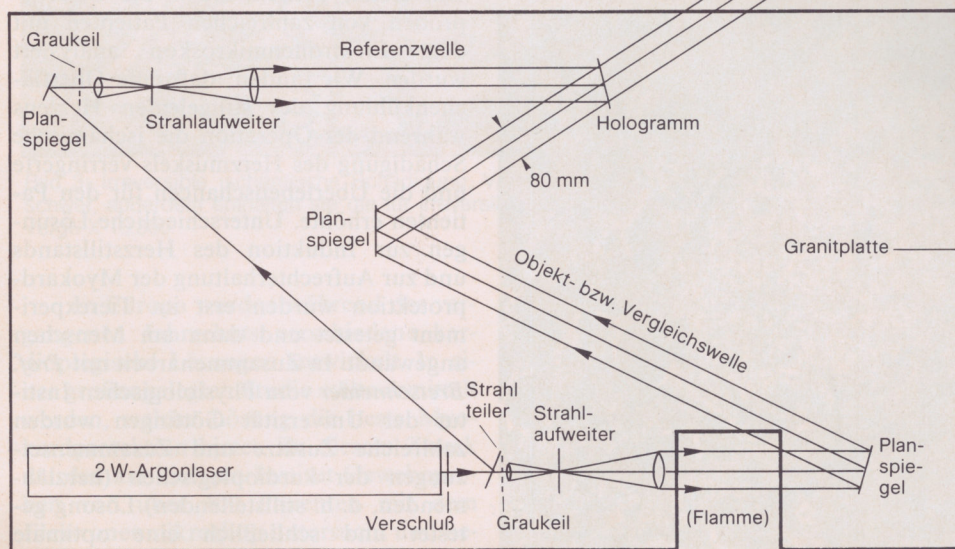


Bild 2: Holografisches Real-time-Durchlicht-Interferometer zur Sichtbarmachung kohärenter Synchronstrukturen in Tankflammen (vgl. auch Titelbild). Die durch die Flamme deformierte Objektwelle überlagert sich hinter dem Hologramm mit der rekonstruierten Vergleichswelle und bildet dort ein Interferenzfeld, das jede Veränderung der Verbrennungsvorgänge kontinuierlich wiedergibt.