

# Experimentelle Untersuchung der Massenabbrandraten multipler n-Heptan und Di-tert-butylperoxid Poolfeuer

Stefan Schälke<sup>1,2</sup>, Kirti Bhushan Mishra<sup>1</sup>, Klaus-Dieter Wehrstedt<sup>1</sup>, Axel Schönbacher<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Fachbereich 2.2 „Reaktionsfähige Stoffe und Stoffsysteme“, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

<sup>2</sup> Universität Duisburg-Essen, Institut für Technische Chemie I, Universitätsstr. 7, 45141 Essen

## Kurzfassung:

Es werden Experimente zur Bestimmung der Massenabbrandraten von multiplen Poolfeuern präsentiert. Als Modellsubstanzen dienen n-Heptan und Di-tert-butylperoxid (DTBP). Es werden Versuche im Labormaßstab mit Durchmessern von  $d = 6$  cm und relativen Abständen von  $0.08 \leq D/d \leq 4$  beschrieben und durch Feldversuche mit Pooldurchmessern  $d = 1.5$  m und relativen Abständen zwischen den Pool von  $0.17 \leq D/d \leq 1$  ergänzt. Es kann gezeigt werden, dass die Massenabbrandraten multipler Feuer im Vergleich zu Einzelfeuern mit gleicher Brennstoffoberfläche bis zu einem Faktor 5.9 (n-Heptan) und 1.6 (DTBP) erhöht sind. Die Erhöhung ist abhängig vom relativen Abstand zwischen den Pools  $D$ , der Anzahl der Pools  $N$  und vom jeweiligen Brennstoff und zeigt ein lokales Maximum, welches mit dem Merging-Bereich der Flammenverschmelzung zusammenfällt. Die Massenabbrandrate als Funktion des relativen Abstandes zwischen den Pools kann durch eine Vergrößerung der Flammenbodenoberfläche infolge Flammenverschmelzung erklärt werden.

## 1. Einleitung

Kommt es während des Transports oder der Lagerung von flüssigen Brennstoffen zu einer unfallbedingten Freisetzung und Zündung, kann es zu Pool-, Tank- oder Lachenfeuern, welche zu den nicht-vorgemischten, auftriebsbestimmten Feuern zählen, kommen. Durch die sich dabei ausbildenden Feuer, ist mit großen Schäden an benachbarten verfahrenstechnischen Anlagen und vor allem an Personen zu rechnen [1]. Das große Gefahrenpotential von Mineralölprodukten und organischen Peroxiden bei Bränden für Menschen und Schutzobjekte besteht nicht allein beim Transport und der Lagerung sondern auch beim weiteren Umgang, d. h. zusätzlich bei der Verarbeitung, Vermischung, Förderung und beim Fortleiten derartiger Stoffe [2]. Eine realistische Beschreibung der Wechselwirkung von Poolfeuern (Pooldurchmesser  $d$ ) und deren Auswirkungen ist daher nicht nur Gegenstand wissenschaftlichen Interesses, sondern auch eine sicherheitstechnisch relevante Fragestellung, nicht erst seitdem neue Untersuchungen gezeigt haben, dass die Wechselwirkung insbesondere der thermischen Strahlung zwischen mehreren Feuern mit einer Erhöhung der Massenabbrandraten  $\dot{m}_f''$  einhergeht [3]. Ein erster Schritt zur Erforschung der Wechselwirkung von Poolflammen besteht in der experimentellen Untersuchung im Labormaßstab. Insbesondere die Untersuchung der Abbrandraten von multiplen Poolfeuern von n-Heptan (KW) und Di-tert-butylperoxid (DTBP), stellt eine gute Methode zur Erweiterung des Wissens über die Wechselwirkung von Bränden dar.

## 2. Wechselwirkung zwischen Feuern

Zur Diskussion der Wechselwirkung von Feuern werden die Abmessungen in Abb. 1 genutzt.

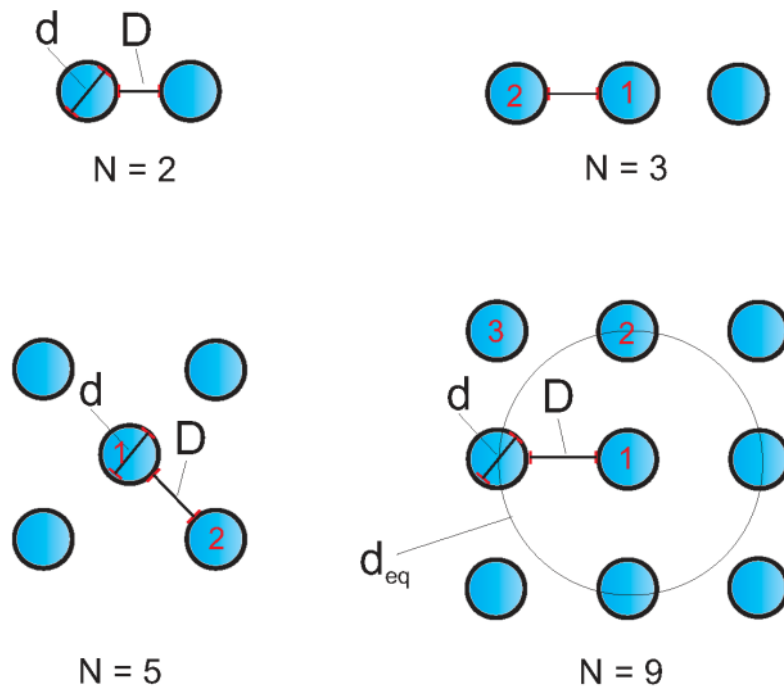


Abb. 1 Schematische Darstellung der Abmessungen zur Untersuchung multipler Feuer

Die ersten Untersuchungen zur Wechselwirkung von Feuern wurden von Putnam und Speich [4, 5] an Propan- und Wasserstoff-Brennerflammen durchgeführt. Dabei wurden sehr hohe Reynolds-Zahlen  $Re > 5000$  eingestellt. Die Untersuchungen wurden mit Brennerdurchmessern von  $d = 0.3 \text{ cm}$  sowie mit relativen Abständen von  $D/d < 2$  durchgeführt und ergaben für die Flammenlänge  $H$  den folgenden Zusammenhang:

$$\frac{\bar{H}}{d} = 7.44 \left( \frac{N \dot{m}_f'' T_{bp}}{M d^{0.5}} \right)^{0.4} \quad (1)$$

Hierin ist  $T_{bp}$  die Siedetemperatur und  $M$  die molare Masse. Die beobachteten Flammen sind um bis zu einem Faktor 2.3 höher, im Vergleich zum gleichen einzelnen Brenner mit gleicher Strömungsgeschwindigkeit. Eine Flammenverschmelzung wurde ab einem relativen Abstand von  $D/d = 2d$  festgestellt. Thomas et al. [6] untersuchten die Flammenverschmelzung von zwei rechteckigen Erdgas-Brennern mit den Maßen  $60 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ . Das Phänomen der Flammenverschmelzung wurde durch den Druckabfall im Raum zwischen den Flammen, infolge der Begrenzung des Luft-Entrainments, erklärt. Untersucht wurden relative Abstände  $0.05 \leq D/d \leq 1$ . Es wurde eine Energiebilanz aufgestellt, die Auftrieb und Neigungswinkel mit dem zwischen den Flammen entstehenden Unterdruck gleichsetzt. Für den relativen Abstand an dem die Flammenverschmelzung beginnt wurde der Zusammenhang Gl. 2 gefunden.

$$\frac{\bar{H}}{d} = 9 \left( \frac{D}{d} \right)^{0.5} \quad (2)$$

Baldwin [7] untersuchte theoretisch den Zusammenhang zwischen Flammenlänge und dem relativen Abstand multipler Feuer anhand von Literaturwerten.

Die hauptsächlich auf Erdgasflammen basierenden Untersuchungen lieferten:

$$\frac{D}{d} = 0.14 \left( \frac{\bar{H}}{d} \right)^{0.96} \quad . \quad (3)$$

In [8] wird beschrieben, dass die dimensionslose, auf den äquivalenten Durchmesser bezogene Flammenlänge von  $N = 3$  und  $N = 4$  Hexan-Poolfeuern ( $d = 12$  cm) mit steigendem relativen Abstand  $D/d$  zwischen den Pools abnimmt. Es wird ein Korrekturfaktor bezüglich der geometrischen Anordnung eingeführt anhand dessen die Flammenlängen korreliert werden:

$$\left( \frac{\bar{H}}{d_{eq}} \right)_{multi} = \left( \frac{N(d^2 + D^2)}{Nd^2 + D^2} \right)^{-0.4} \left( \frac{\bar{H}}{d_{eq}} \right)_{single} \quad . \quad (4)$$

Eine ähnliche Modellierung ist auch in [9] beschrieben. Hier wurden multiple Feuer bestehend aus Propan-Brennern ( $d = 15$  cm) und speziellen Holzscheite-Brennern ( $d = 15$  cm) mit bis zu  $N = 25$  einzelnen Feuern untersucht. Es wurde die folgende Korrelation nach Zukoski [10], für multiple Feuer erweitert und überprüft:

$$\frac{\bar{H}}{d_{eq}} = 3.3 \left( \frac{\dot{Q}_c}{\rho_{air} c_{p,air} T_{air} g^{0.5} W^{2.5}} \right)^{0.4} = 3.3 Q^*{}^{0.4} \quad , \quad (5)$$

mit

$$W = \sqrt{N}d + (\sqrt{N} - 1)D \quad . \quad (6)$$

Hierin ist  $\dot{Q}_c$  die totale Wärmefreisetzungsrate,  $\rho_{air}$  die Dichte der Umgebungsluft,  $c_{p,air}$  die Wärmekapazität der Umgebungsluft,  $T_{air}$  die Temperatur der Umgebungsluft und  $g$  die Erdbeschleunigung. Eine Überprüfung zeigte, dass für eine 3x3-Matrix die folgenden Korrelationen bessere Übereinstimmungen erzielten:

$$\frac{\bar{H}}{d_{eq}} = 2.85 Q^*{}^{0.68} \text{ für Propan} \quad , \quad (7)$$

und

$$\frac{\bar{H}}{d_{eq}} = 3.66 Q^*{}^{0.82} \quad \text{für Holzscheite} \quad . \quad (8)$$

Weng et al. präsentierten in [11] CFD-Simulationen einer 2x2-Matrix mit  $d = 15$  cm Brennern, welche mit dem Fire Dynamic Simulator (FDS) durchgeführt wurde. Zur Beschreibung des Verbrennungsprozesses wurde ein "Mixture fraction"- Model verwandt. Für die Strahlung wurde die Strahlungstransportgleichung, unter Annahme eines grauen Gases, gelöst. Fukuda et al. [12] zeigten, dass sich die Pulsationsfrequenz von zwei n-Heptan- und Methanol-Poolfeuer ( $d = 4.9$  cm) mit dem relativen Abstand  $D/d$  ändert. Untersuchungen der Abbrandzeiten und der maximalen Flammenlängen von multiplen Heptan-Poolfeuern wurden in [3, 13, 14] vorgestellt. Es wurden bis zu  $N = 225$  einzelne Feuer untersucht und ein relativer Abstand von  $3.3 \leq D/d \leq 8.3$  verwandt. Dabei konnte erstmals die Verteilung der Brenndauern zwischen den einzelnen Pools in einer Matrix aufgeschlüsselt und diskutiert werden.

Als Zusammenhang zwischen dem relativen Abstand und der maximalen Flammenlänge  $H_{\max}$  wird der folgende Zusammenhang angegeben:

$$\frac{D}{d} = 0.33 \left( \frac{H_{\max}}{d} \right)^{0.96} \quad (9)$$

### 3. Experimenteller Teil

Als Brennstoff für die Experimente im Labormaßstab, wurde technische reines Di-tert-butylperoxid (> 99 %) sowie technisch reines n-Heptan (> 98 %) verwendet. Die Feldversuche wurden ebenfalls mit technisch reinem Di-tert-butylperoxid (> 99%) durchgeführt sowie mit einer Hexan-Fraktion, bestehend aus n-Hexan (54 %), 2-Methylpentan (19.4 %), 3-Methylpentan (19.4 %), Methylcyclopentan (7.2 %) und anderen Spurenstoffen, wobei der Anteil an aromatischen Verbindungen, wie Benzol < 0.1 % beträgt. Versuche mit einer Hexan-Fraktion im Labormaßstab zeigten, dass die Ergebnisse nicht signifikant von denen mit technisch reinem n-Heptan abweichen. Somit sind die Ergebnisse der Versuche im Labormaßstab und die Feldversuche miteinander vergleichbar.

#### 3.1 Versuchsaufbau

Die Experimente im Labormaßstab wurden in einem speziellen für Feuer tests ausgelegten Bunker (ca. 10 m x 5 m x 5 m) durchgeführt. Vor den Versuchen wurde ein Belüftungssystem genutzt, um im Bunker vergleichbare Umgebungsbedingungen zu schaffen. Um windstille Bedingungen zu erreichen, wurde das Belüftungssystem während der Versuche abgeschaltet. Als Pooldurchmesser für die Experimente an multiplen Feuern wurde  $d = 6$  cm gewählt. Die Versuche wurden mit einer Anzahl an Feuern  $2 \leq N \leq 9$  durchgeführt. Der Abstand zwischen den Pools wurde je nach Stärke der Wechselwirkung zwischen  $0.08 \leq D/d \leq 4$  gewählt. Die Experimente wurden auf einer Gitterkonstruktion mit einer definierten Maschenweite durchgeführt, um genaue Abstände zwischen den einzelnen Pools zu gewährleisten. Ebenso ist es durch die Gitterkonstruktion möglich, Wägezellen zur Bestimmung der Massenabbrandraten unterhalb des Gitters anzubringen, was eine simultane Bestimmung der Massenabbrandraten aller wichtigen Positionen möglich macht. Die Brennstofftemperatur zu Beginn der Experimente betrug  $T_f \approx 293$  K.

Die Feldversuche wurden auf dem Sprengplatz des BAM Testgeländes Technische Sicherheit in Horstwalde durchgeführt. Auf dem Sprengplatz mit einem Durchmesser von 400 m können Versuche bis zu einem TNT-Äquivalent von 150 kg durchgeführt werden. Zum Schutz der Umgebung ist der Sprengplatz von einem Erdwall umgeben. Die Versuche wurden während einer Wetterlage mit schwachem Wind durchgeführt. Als Pooldurchmesser für die Experimente an multiplen Feuern wurde  $d = 1.5$  m gewählt. Die Versuche wurden mit einer Anzahl an Feuern  $N = 2$  durchgeführt (s. Abb. 2). Der Abstand zwischen den Pools wurde je nach Stärke der Wechselwirkung zwischen  $0.17 \leq D/d \leq 1$  gewählt. Die gewählten Abstände zwischen den Pools ergeben sich im Falle der KW-Brennstoffe (für Hexan, Heptan die Gefahrenklasse A I) aus der TRbF 20: "Läger, Abstände, Schutzstreifen und Tankgruppenabstände" [15]. Die TRbF 20 sieht je nach Lagervolumen, Art der Tanks und Ausrichtung der Tanks, Mindestabstände zwischen den einzelnen Tanks von  $0.3 d < D < 0.6 d$  vor. Die Anzahl der untersuchten Tanks kann in dieser Untersuchung auf  $N = 9$  begrenzt werden, da die TRbF 20 maximal 10 Tanks in beliebiger Bauart für eine Tankgruppe vorsieht. Zwischen einzelnen Tankgruppen sind geeignete Schutzmaßnahmen wie z.B. Schutzstreifen einzurichten, so dass eine Tankgruppe als in sich abgeschlossen angenommen werden kann. Die Sicherheitsabstände in Peroxidlagern werden durch die BGV B4 „Organische Peroxide“

geregelt [16]. Die BGV B4 sieht für Lager organischer Peroxide (der Gefahrengruppe OP Ib, für DTBP) je nach Lagervolumen, Art des Lagers und dessen Ausrichtung, Mindestabstände zwischen einzelnen Lagern von bis zu  $D < 4d$  vor. Die oben genannten Abstände wurden im Labormaßstab mit kleiner Schrittweite über den gesamten Bereich hin untersucht. Die Feldversuche dienten der Überprüfung der Ergebnisse im Labormaßstab und wurden an signifikanten Abständen, zur Absicherung der Experimente im Labormaßstab, durchgeführt.



Abb. 2 Aufbau der Abbrandwannen ( $d = 1.5 \text{ m}$ ) mit  $D/d = 0$

### 3.2 Massenabbrandraten

Die Bestimmung des Masseverlustes im Labormaßstab erfolgte mit einer elektronischen Präzisionswaage der Fa. Sartorius und Wägezellen der Fa. HBM sowie eigens dafür entwickelten LabView Programmen. Der Masseverlust wurde dabei mit einer zeitlichen Auflösung von  $\Delta t = 0.01 \text{ s}$  und einer Präzision von  $0.1 \text{ g}$  bestimmt. Die Bestimmung des Masseverlustes während der Feldversuche erfolgte mit Industriewaagen der Fa. Schoutz sowie mit einem eigens dafür entwickelten LabView Programm. Der Masseverlust wurde dabei mit einer zeitlichen Auflösung von  $\Delta t = 0.2 \text{ s}$  und einer Präzision von  $0.01 \text{ kg}$  bestimmt. Die Massenabbrandrate ergibt sich in beiden Fällen als  $-\frac{dm_f''}{dt}$  im Bereich zwischen 20 % bis 80 % des Masseverlustes. Jeder Versuch im Labormaßstab wurde fünfmal wiederholt. Die Feldversuche konnten, aufgrund der begrenzten Ressourcen, nur einmal pro Abstand durchgeführt werden.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Massenabbrandraten multipler Poolfeuer

#### 4.1.1 Massenabbrandraten von KW-Poolfeuern

Die Massenabbrandraten  $\dot{m}_f''$  multipler KW-Poolfeuer können der Abb. 3 entnommen werden, wobei der geometrische Aufbau der Versuche in Abb. 1 erklärt ist. Bei einem Abstand von  $D/d = 0$  ist jeweils ein Referenzfeuer mit einem Radius  $d_{eq}$  entsprechend der gleichen Brennstoffoberfläche wie das multiple Feuer aufgetragen. Multiple n-Heptan-Poolfeuer mit  $d = 6 \text{ cm}$  und  $N = 2$  zeigen mit größer werdendem relativen Abstand ansteigende  $\dot{m}_f''$  mit einem Maximum bei  $D/d = 0.25$ . Das Verhältnis  $\dot{m}_{f,max}''/\dot{m}_{f,eq}'' = 1.9$  zeigt eine ungefähre Verdopplung der Massenabbrandrate an. Nach dem Maximum fällt  $\dot{m}_f''(D/d)$  ab, bis sich bei  $D/d = 0.67$  ein stationärer Wert in der Größenordnung von  $\dot{m}_{f,eq}''$  einstellt.

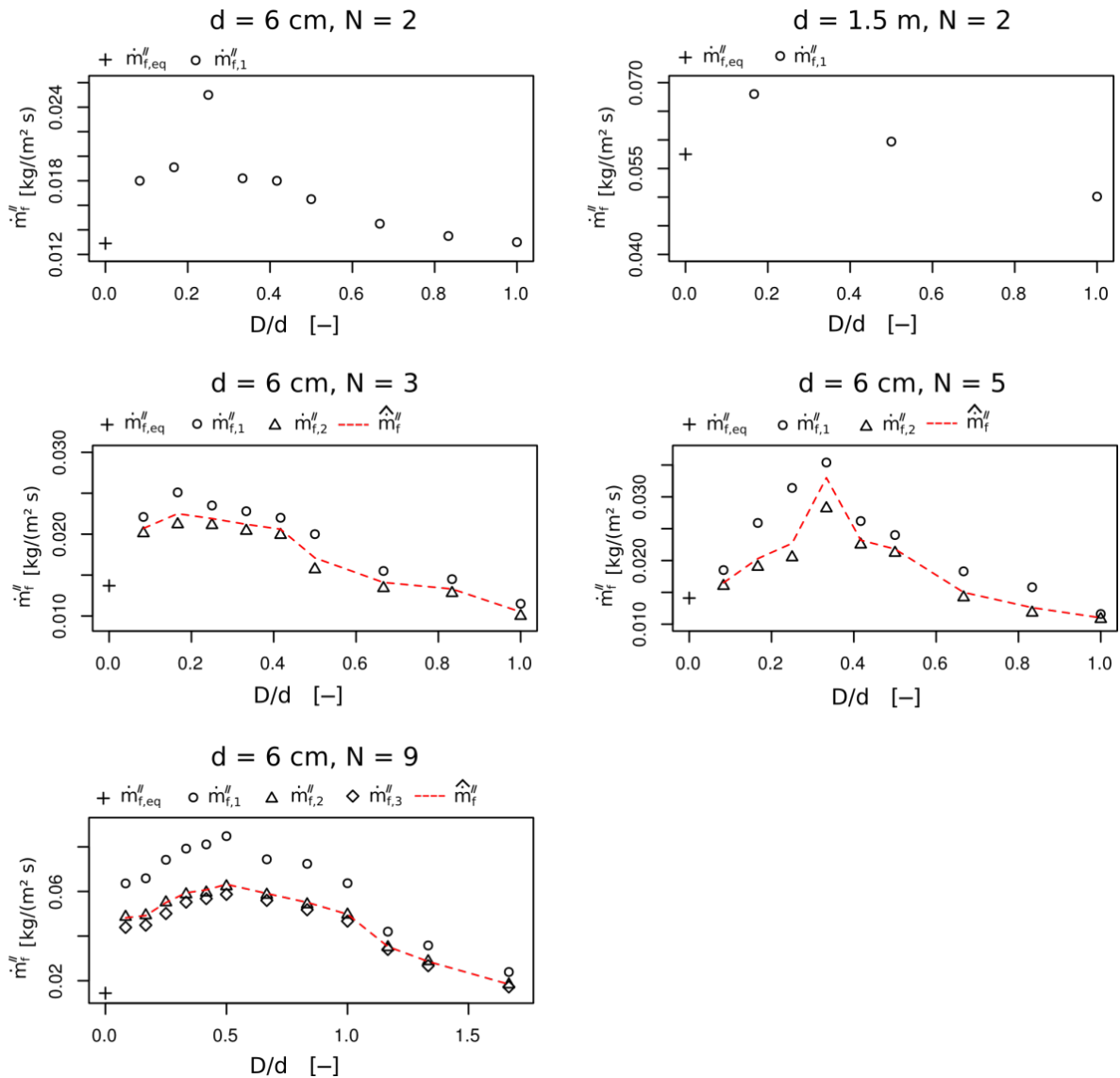


Abb. 3 Massenabbrandraten  $\dot{m}_f''$  multipler KW-Poolfeuer

Die Steigerung der Massenabbrandrate in Bezug auf einen einzelnen Pool des Durchmessers  $d_s$  ist nur unwesentlich größer als die in Bezug auf den äquivalenten Durchmesser gleicher Brennstoffoberfläche  $\dot{m}_{f,max}''/\dot{m}_{f,s}'' = 2.2$ . Im Feldversuch mit  $d = 1.5 \text{ m}$  und  $N = 2$  ist ebenfalls ein Maximum zu beobachten, welches bei  $D/d = 0.17$  zu erkennen ist. Die im Vergleich leichte Verschiebung des Maximums in den Feldversuchen ist nicht repräsentativ, da aufgrund der geringen Anzahl an Versuchen eine genaue Bestimmung der Lage des Maximums nicht möglich ist. Es kann daher von einer relativen Übereinstimmung der Lage der beiden Maxima für  $N = 2$  ausgegangen werden. Die Steigerung der Massenabbrandrate  $\dot{m}_{f,max}''/\dot{m}_{f,eq}'' = 1.2$  ist niedriger als im Labormaßstab beobachtet. Eine Begründung hierfür ist die mit zunehmendem Pooldurchmesser steigende optische Dichte und die damit verbundene niedrigere Transmission in der Flamme sowie die mit größerem  $d$  einsetzenden Blockage-Effekte. Es ist daher davon auszugehen, dass der Einfluss zusätzlicher Wärmestrahlung auf  $\dot{m}_f''$  mit zunehmendem Pooldurchmesser abnimmt.

Bei einem multiplen n-Heptan-Poolfeuer mit  $d = 6 \text{ cm}$  und  $N = 3$  zeigt sich ebenfalls ein ansteigendes  $\dot{m}_f''$  mit einem Maximum bei  $D/d = 0.25$ . Die maximale Steigerung der Massenabbrandrate ist mit  $\dot{m}_{f,max}''/\dot{m}_{f,eq}'' = 1.7$  in der gleichen Größenordnung wie bei einem multiplen Feuer mit  $d = 6 \text{ cm}$  und  $N = 2$ . Ebenso ist der Unterschied zwischen dem mittleren und den äußeren Pools mit  $\dot{m}_{f,1}''/\dot{m}_{f,2}'' = 1.1$  sehr gering. Es zeigt sich somit, dass für KW-

Brennstoffe eine Erhöhung der brennenden Pools von  $N = 2$  auf  $N = 3$  einen sehr geringen Einfluss auf  $\dot{m}_f''$  hat.

Eine größere Steigerung von  $\dot{m}_f''$  wird mit einer größer werdenden Anzahl an Pools  $d = 6$  cm,  $N = 5$  und  $d = 6$  cm,  $N = 9$  beobachtet. Für  $N = 5$  ist eine maximale Steigerung der Massenabbrandrate von  $\dot{m}_{f,max}''/\dot{m}_{f,eq}'' = 2.5$  erkennbar. Im Falle von  $N = 9$  liegt die Steigerung bei  $\dot{m}_{f,max}''/\dot{m}_{f,eq}'' = 5.9$ . Es zeigt sich somit eine starke Steigerung von  $\dot{m}_f''$  mit zunehmender Anzahl an brennenden Pools  $N$ . Ebenso erhöht sich das Verhältnis der Massenabbrandraten des inneren im Vergleich zu den äußeren Pools. Dabei ergeben sich Verhältnisse  $\dot{m}_{f,1}''/\dot{m}_{f,2}'' = 1.3$  für  $N = 5$  und  $\dot{m}_{f,1}''/\dot{m}_{f,2}'' = 1.5$  für  $N = 9$ . Es ist zudem erwähnenswert, dass in einem multiplen Poolfeuer mit  $N = 9$  die beiden äußeren Positionen  $\dot{m}_{f,2}''/\dot{m}_{f,3}'' = 1.1$  in ihrem Abbrandverhalten annähernd gleich sind. Ebenso verschieben sich die Maxima der Verteilungen zu größeren  $D/d$ , wobei für  $N = 5$  ein Wert von  $D/d = 0.33$  und für  $N = 9$  ein Wert von  $D/d = 0.5$  erreicht wird. Auffällig ist, dass das Maximum der Massenabbrandrate mit der Grenze des Merging-Bereichs  $D_{\text{merg}} = d$  [17] zusammenfällt, indem sich die einzelnen Flammen zu einer gemeinsamen Flammensäule vereinigen. Es kommt somit in einem multiplen Feuer durch die Flammenverschmelzung zu einer Verbreiterung des Flammenbodens, insbesondere über dem mittleren Pool. Die Verschiebung des Maximums der Massenabbrandraten zu größeren relativen Abständen  $D/d$  geht daher mit einer Verbreiterung des Flammenbodens durch Flammenverschmelzung und den mit steigendem  $D/d$  größer werdenden Flammenbodenflächen  $A_{fb}$  einher. Unter Annahme eines Flammenbodendurchmessers von  $d_{fb} = 2(d + D)$  für  $N = 5$  ergeben sich die in Tab. 1 angegebenen Einstrahlzahlen  $\varphi_{F,f}$  sowie Flammenbodenflächen  $A_{fb}$ . Wird nun für  $N = 5$  das Verhältnis  $A_{fb}\varphi_{F,f}(D/d = 0.33)/A_{fb}\varphi_{F,f}(D/d = 0.08) = 1.9$  mit den Verhältnissen der Massenabbrandraten  $\dot{m}_f''(D/d = 0.33)/\dot{m}_f''(D/d = 0.08) = 1.9$  verglichen, so zeigt sich, dass der Verlauf der Massenabbrandraten als Funktion des relativen Abstandes im Merging-Bereich stark durch die Flammgeometrie bestimmt ist. Eine weitere Vergrößerung des relativen Abstandes in den Transition-Bereich hinein bewirkt, dass die Vergrößerung des Flammenbodens zeitabhängig wird und mit zunehmendem  $D/d$  abnimmt. Hierdurch ist auch der Abfall von  $\dot{m}_f''$  im Transition-Bereich zu erklären. Im Separation-Bereich stellen sich anschließend Verhältnisse ein, die einem Einzelfeuer ähnlich sind.

Tab. 1 Flammenbodenhöhen  $H_{fb}$ , Flammenbodenflächen  $A_{fb}$  und Einstrahlzahlen  $\varphi_{F,f}$  für multiple n-Heptan-Poolfeuer  $N = 5$ ,  $d = 6$  cm

$D/d$ [-]	$A_{fb}$ [cm <sup>2</sup> ]	$\varphi_{F,f}$ [-]	$A_{fb}\varphi_{F,f}$ [cm <sup>2</sup> ]
0.08	133	0.029	3.86
0.17	154	0.032	4.93
0.25	177	0.032	5.66
0.33	201	0.036	7.24

#### 4.1.2 Massenabbrandraten von DTBP-Poolfeuern

Die Massenabbrandraten  $\dot{m}_f''$  multipler DTBP-Poolfeuer können der Abb. 4 entnommen werden, wobei der geometrische Aufbau der Versuche in Abb. 1 erklärt ist. Für ein multiples DTBP-Poolfeuer  $d = 6$  cm,  $N = 2$  steigen die Massenabbrandraten  $\dot{m}_f''$  mit steigendem relativen Abstand  $D/d$  zwischen den Pools an, wobei ein Maximum bei  $D/d = 0.5$  beobachtet wird. Das Maximum ist im Vergleich zu einem Heptan-Poolfeuer zu größeren relativen Abständen vorschoben, was durch den breiteren Merging-Bereich [17] und die dadurch entstehenden größeren Flammenoberflächen zu erklären ist. Die Steigerung der Massenabbrandrate ist im Falle des DTBPs  $\dot{m}_{f,max}''/\dot{m}_{f,eq}'' = 1.12$  und somit deutlich geringer, als die des Heptan. Durch die relative Unabhängigkeit der Massenabbrandrate vom

Pooldurchmesser liefert  $\dot{m}''_{f,max}/\dot{m}''_{f,s} = 1.12$  keinen Unterschied. Die Feldversuche mit  $N = 2$  und  $d = 1.5$  m zeigen ein Maximum bei  $D/d = 0.2$  welches mit einer Steigerung der Massenabbrandrate von  $\dot{m}''_{f,max}/\dot{m}''_{f,eq} = 1.06$  einhergeht. Die relativ niedrige Steigerung kann zum einen durch die schon weiter oben beschriebene höhere optische Dichte und Blockage-Effekte erklärt werden. Desweiteren ist die Anzahl der Versuche zu einer genauen Bestimmung des Maximums nicht ausreichend. Bei einem multiplen Poolfeuer mit  $N = 3$  und  $d = 6$  cm wird eine Verschiebung des Maximums der Massenabbrandrate zu einem relativen Abstand von  $D/d = 0.67$  beobachtet. Bei einem multiplen DTBP-Poolfeuer ist bereits bei  $N = 3$ , im Unterschied zu Heptan-Poolfeuern, eine Steigerung der Massenabbrandrate  $\dot{m}''_{f,max}/\dot{m}''_{f,s} = 1.25$  zu erkennen, obwohl der absolute Wert der Steigerung unter dem eines multiplen Heptan-Poolfeuers liegt. Der Unterschied von  $\dot{m}''_f$  zwischen den inneren und den äußeren Pools ist mit  $\dot{m}''_{f,1}/\dot{m}''_{f,2} = 1.03$  sehr gering. Für multiple DTBP-Poolfeuer mit  $N = 5$  und  $N = 9$  wird jeweils ein Maximum der Massenabbrandrate bei  $D/d = 0.83$  beobachtet. Die Steigerungen der Massenabbrandraten sind ebenfalls relativ niedriger im Vergleich zu Heptan-Poolfeuern, mit  $\dot{m}''_{f,max}/\dot{m}''_{f,eq} = 1.35$  für  $N = 5$  und  $\dot{m}''_{f,max}/\dot{m}''_{f,eq} = 1.56$  für  $N = 9$ .

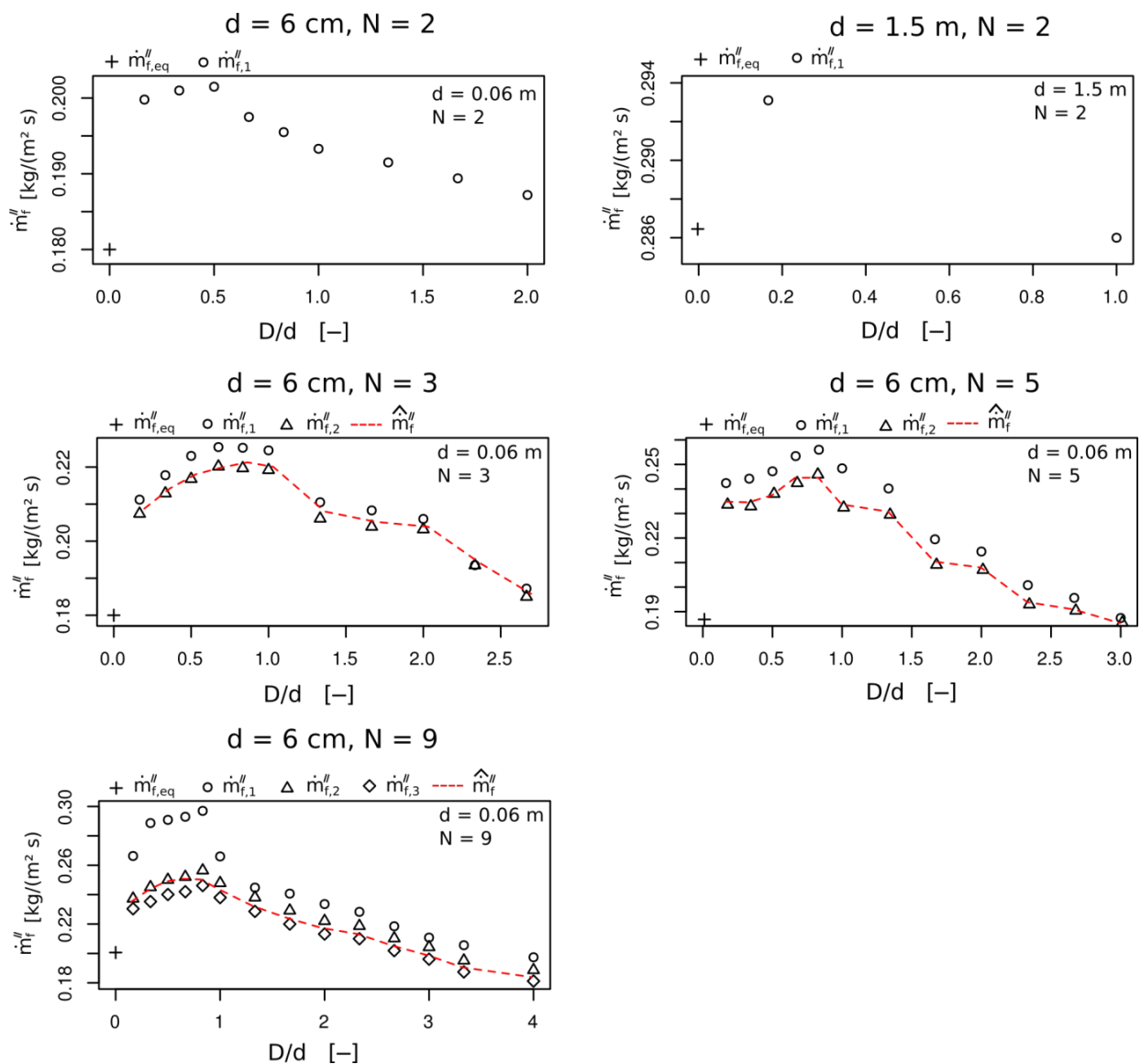


Abb. 4 Massenabbrandraten  $\dot{m}''_f$  multipler DTBP-Poolfeuer



Wie auch schon bei den Heptan-Poolfeuern beschrieben, kommt es auch bei multiplen DTBP-Poolfeuern zu einer Verbreiterung des Flammenbodens, insbesondere über dem mittleren Pool. Die Verschiebung des Maximums der Massenabbrandraten zu größeren relativen Abständen  $D/d$  geht auch hier mit einer Verbreiterung des Flammenbodens durch Flammenverschmelzung [17] und den mit steigendem  $D/d$  größer werdenden Flammenbodenflächen  $A_{fb}$  einher. Folglich sind die Maxima von DTBP-Poolfeuer aufgrund des größeren Merging-Bereiches zu größeren relativen Abständen hin verschoben. Unter Annahme eines Flammenbodendurchmessers von  $d_{fb} = 2(d + D)$  für  $N = 5$  ergeben sich die in Tab. 5.7 angegebenen Einstrahlzahlen  $\varphi_{F,f}$  nach [18] sowie Flammenbodenflächen  $A_{fb}$ . Ebenso steigert sich das Verhältnis der Massenabbrandraten des inneren im Vergleich zu den äußeren Pools. Dabei unterscheiden sich die Verhältnisse im Merging-Bereich [17] mit  $\dot{m}''_{f,1}(D/d = 0.83)/\dot{m}''_{f,2}(D/d = 0.83) = 1.04$  ( $N = 5$ ) und  $\dot{m}''_{f,1}(D/d = 0.83)/\dot{m}''_{f,2}(D/d = 0.83) = 1.2$  ( $N = 9$ ), von denen im Transition- und Separation-Bereich  $\dot{m}''_{f,1}(D/d = 2.67)/\dot{m}''_{f,2}(D/d = 2.67) = 1.5$  ( $N = 5$ ) und  $\dot{m}''_{f,1}(D/d = 2.67)/\dot{m}''_{f,2}(D/d = 2.67) = 1.01$  ( $N = 9$ ). Es ist zudem erwähnenswert, dass in einem multiplen Poolfeuer mit  $N = 9$  die beiden äußeren Position  $\dot{m}''_{f,2}/\dot{m}''_{f,3} = 1.1$  in ihrem Abbrandverhalten nahezu gleich sind. Da bei DTBP-Poolfeuern  $\dot{Q}_{ba,rad}/\dot{Q}_{ba,tot} = 1$  nicht gilt, muss in einer weiteren Betrachtung der Anteil der Wärmestrahlung am gesamten Wärmerückstrom berücksichtigt werden. Wird nun für  $N = 5$  das Verhältnis  $\frac{\dot{Q}_{ba,rad} A_{fb} \varphi_{F,f}(\frac{D}{d}=0.83)}{\dot{Q}_{ba,tot} A_{fb} \varphi_{F,f}(\frac{D}{d}=0.08)} = 1.11$  mit den Verhältnissen der Massenabbrandraten  $\dot{m}''_f(D/d = 0.83)/\dot{m}''_f(D/d = 0.08) = 1.06$  verglichen, zeigt sich, dass der Verlauf der Massenabbrandraten als Funktion des relativen Abstandes im Merging-Bereich stark durch die Flammgeometrie bestimmt ist. Eine weitere Vergrößerung des relativen Abstandes in den Transition-Bereich hinein bewirkt auch bei multiplen DTBP-Poolfeuern, dass die Vergrößerung des Flammenbodens zeitabhängig wird und mit zunehmendem  $D/d$  abnimmt. Auch die Steigerung der Massenabbrandraten von multiplen Peroxid-Poolfeuern kann mit der Erhöhung des Wärmerückstromes durch Wärmestrahlung infolge einer Vergrößerung des Flammenbodens begründet werden. Die relativ niedrigen Steigerungen der Massenabbrandraten von DTBP-Poolfeuern im Vergleich zu Heptan-Poolfeuern können durch den geringeren Anteil des Wärmerückstromes durch Strahlung am gesamten Wärmerückstrom erklärt werden. Zudem ist die Flammenbodenfläche auch bei einem einzelnen DTBP-Poolfeuer bereits verbreitert, so dass die Verbreiterung durch die Flammenverschmelzung einen geringeren Einfluss hat.

Tab. 2 Flammenbodenhöhen  $H_{fb}$ , Flammenbodenflächen  $A_{fb}$  und Einstrahlzahlen  $\varphi_{F,f}$  für multiple DTBP-Poolfeuer  $N = 5$ ,  $d = 6$  cm

$D/d$ [—]	$A_{fb}$ [cm <sup>2</sup> ]	$\varphi_{F,f}$ [—]	$A_{fb} \varphi_{F,f}$ [cm <sup>2</sup> ]
0.17	154	0.0122	1.9
0.33	201	0.0127	2.6
0.5	254	0.0128	3.3
0.67	314	0.0135	4.2
0.83	380	0.0136	5.2

#### 4.1.3 Fehleranalyse bei der Ermittlung der Massenabbrandraten

Eine Abschätzung des statistischen Messfehlers soll anhand der Massenabbrandraten eines multiplen DTBP-Poolfeuers mit  $d = 6$  cm und  $N = 2$  erfolgen. Über alle gemessenen relativen Abstände ergibt sich ein absoluter Fehler als halbe Breite des Konfidenzintervalls ( $\alpha = 0.9$ ) von  $e = 0.0055$  kg/(m<sup>2</sup> s). Es ergibt sich ein gemittelter, relativer Fehler von  $(e/\dot{m}''_f)_{av} = 0.013$ .

## 5. Schlussfolgerungen

Es können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Die Massenabbrandraten multipler Poolfeuer sind im Vergleich mit einem Einzelpoolfeuer gleicher Brennstoffoberfläche erhöht. Die Erhöhung von  $\dot{m}_f''$  steigt mit zunehmender Anzahl brennender Pools  $N$  weiter an.
2. Die Steigerung von  $\dot{m}_f''$  ist stark brennstoffabhängig. Brennstoffe mit einem hohen Anteil des Strahlungswärmerückstroms am gesamten Wärmerückstrom (n-Heptan) zeigen eine größere Steigerung von  $\dot{m}_f''$  als Brennstoffe bei denen der Anteil des Strahlungswärmerückstroms am gesamten Wärmerückstrom geringer ist (DTBP).
3. Die Massenabbrandraten  $\dot{m}_f''(D/d)$  multipler Feuer als Funktion des relativen Abstandes zwischen den Pools zeigen ein lokales Maximum, welches mit der brennstoffabhängigen Grenze des Merging-Bereichs infolge Flammenverschmelzung zusammenfällt.
4. Der Verlauf von  $\dot{m}_f''(D/d)$  kann durch eine Vergrößerung der Flammenbodenoberfläche als Folge der Flammenverschmelzung erklärt werden.

## Literatur:

- [1] Gawlowski, M., Hailwood, M., Vela, I., Schönbacher, A.; Deterministic and probabilistic estimation of appropriate distances: Motivation for considering the consequence for industrial sites; Chem.-Eng.-Technol. 32(2) (2009), 182-198.
- [2] Balluf, C., Brötz, W., Göck, D., Schieß, N., Schönbacher, A.; Erforschung von Schadenfeuern flüssiger Kohlenwasserstoffe als Beitrag zur Sicherheit von Chemieanlagen; Chem.-Ing.-Tech. 57(10) (1985), 823-834.
- [3] Liu, N., Liu, Q., Lozano, J. S., Shu, L., Zhang, L., Zhu, J., Deng, Z., Satoh, K.; Global burning rate of square fire arrays: Experimental correlation and interpretation; Proc. Combust. Inst., 32 (2009), 2519-2526.
- [4] Putnam, A., Speich, C. F.; A model study on the interaction of multiple turbulent diffusion flames; Proc. Combust. Inst., 9 (1963), 867-877.
- [5] Putnam, A.; Area fire considered as a perimeter-line fire; Combust. Flame 7 (1963), 305-307.
- [6] Thomas, P. H., Baldwin, R., Heselden, A. J. M.; Buoyant diffusion flames: some measurements of air entrainment, heat transfer, and flame merging; Proc. Combust. Inst., 10 (1965), 983-996.
- [7] Baldwin, R.; Flame merging; Combust. Flame, 12 (1968) 318-324.
- [8] Sugawa, O., Takahashi, W.; Flame height behavior from multi-fire sources; Fire and Mat., 17 (1993), 111-117.
- [9] Kamikawa, D., Weng, W. G., Kagiya, K., Fukuda, Y., Mase, R., Hasemi, Y.; Experimental study of merged flames from multifire sources in propane and wood crib burners; Comb. Flame, 142 (2005), 17-23.
- [10] E. Zukoski, in G. Cox (Ed.), Combustion Fundamentals, Academic Press, San Diego, 1995.
- [11] W. G. Weng, D. Kamikawa, Y. Fukuda, Y. Hasemi, K. Kagiya; Study on flame height of merged flame from multiple fire sources; Combust. Sci. Technol. 176 (2004), 2123-2123.
- [12] Fukuda, M., Kudo, Y., Ito, A., 2006, Fire characteristics of subsisting multiple fire sources in three dimensions, Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering, 56(3), 1-8.
- [13] Liu, N., Liu, Q., Deng, Z., Satoh, K., Zhu, J.; Burn-out time data analysis on interaction effects among multiple fires in fire arrays; Proc. Comb. Inst. 31 (2007), 2589-2597.
- [14] Liu, N., Liu, Q., Lozano, J. S., Zhang, L., Deng, Z., Yao, B., Zhu, J., Satoh, K.; Effect of flow circulation on combustion dynamics of fire whirl; Proc. Combust. Inst. 33 (2013), 2617-2624.

- [15] Technische Regeln für brennbare Flüssigkeiten (TRbF) 20 - Lager, BArbBl. 4/2001 S. 60, zuletzt geändert BArbBl. 6/2002 S. 63.
- [16] BG RCI, Unfallverhütungsvorschrift Organische Peroxide BGV B4, 1. Januar 2011 mit Durchführungsanweisungen vom Oktober 2000.
- [17] Schälike, S., Mishra, K. B., Wehrstedt, K.-D., Schönbacher, A.; Limiting distances for flame merging of multiple n-heptane and di-tert-butyl peroxide pool fires, Chem. Eng. Trans., 32 (2013), in press, ISBN 978-88-95608-23-5.
- [18] VDI-Wärmeatlas, Strahlung technischer Oberflächen, Kb5, 10. Auf., Springer, Berlin, 2006.