

Die Baustelle im Griff

Vor rund zehn Jahren brannten im August 2001 die Sofiensäle in Wien, Auslöser waren Flämmarbeiten an der Dachkonstruktion. Schlagartig rückte das Thema Brandschutz in den Fokus der Öffentlichkeit. Die hier dargelegten Untersuchungen, speziell zum Einfluss der Neigung auf die Brandausbreitungsgeschwindigkeit, dienen nicht nur der Wissenschaft, sondern sollen Bauherren, gewerblichen und privaten „Verbrauchern“ eine wichtige Orientierungshilfe für praktische Brandschutz- und Sicherheitstechnische Überlegungen geben – auch für (kleinere) Baustellen.

AUTOREN: *Ao. Univ.-Prof. Baurat h.c. DDr. Elmar Bölsckey*
Univ. Ass. DI Dr. techn. Nina Schjerve

Durch (Schadens-)Feuer entstehen in Europa volkswirtschaftliche (Brand-)Schäden in der Größenordnung von mindestens 1% des jährlichen Bruttonationalproduktes [1]. Die Höhe der Schäden und die Auswirkungen sind abhängig von vielen Faktoren wie z. B. der Lage und Menge von brennbaren Materialien, dem Zeitpunkt der Entdeckung und dem Start des Löschvorganges aber auch dem Vorhandensein von Zündquellen.

Auf Baustellen können eine Reihe von Zündquellen (Schweissarbeiten, Löten, Tätigkeiten mit Kunststoffklebern, usw.) und Brandlasten (Verpackungsmaterial, dichte Lagerung, ungeschütztes Baumaterial) vorhanden sein die sich je nach Ausbaustand

merklich von jenem im Endzustand unterschieden können (siehe Bild 1). Ein erhöhtes Sicherheitsbedürfnis der Bevölkerung in den letzten Jahrzehnten und die neuen europäischen Regelungen führten dazu, dass neben den Standardsicherheitsüberlegungen (durch die Statik bzw. Bemessung / Dimensionierung der Bauwerke) auch zunehmend andere Bereiche der Bautechnik – wie die Bauphysik und vor allem die vorbeugenden (baulichen) Brandschutzmaßnahmen – an Bedeutung gewonnen haben und z. B. in der Bauproduktenrichtlinie (BPR2) als wesentliche Anforderungen aufgezählt werden [2].

Brandentwicklung oder der Ablauf von Bränden

Bauprodukte (Baustoffe und Bauteile) werden hinsichtlich Brennbarkeit und Brandnebenerscheinungen (z. B. Qualm- und Tropfenbildung) nach den aktuellen europäischen Normen geprüft und klassifiziert (z. B. Önorm EN 13501-1 bis 5), dies erfolgt jedoch nur für den Einbau / Endverbrauch. Für sogenannte „tragende Bauteile“ soll die aufgebrachte Belastung bzw. das Belastungsniveau im Klassifikationsbericht angeführt werden. Die oft höheren Anforderungen und ungünstigen Lastfälle für den Bauzustand werden nicht abgedeckt. Die Klassifizierungen für den Endverbrauch erfolgen in der Regel nach Prüfungen unter verschiedenen Prüfbrän-

den (Brandszenarien beruhend auf normativen Temperatur-Zeit Kurven) wie z. B. der Schwelfeuerkurve oder der Einheitstemperaturkurve (ETK). Die Anwendung der verschiedenen Brandszenarien erfolgt nach den Anforderungen in der jeweiligen Norm. Die Schwelbrandkurve etwa kommt zur Anwendung, wenn die Leistungsfähigkeit bei Temperaturen der Entstehungsphase eines Brandes geringer ist (z. B. für reaktive oder dämmschichtbildende Brandbeschichtungs-Produkte) und die Außenbrandkurve entspricht der Beanspruchung durch aus dem Fenster eines Gebäudes herausretretendes Feuer. Die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) wiederum wurde im Wesentlichen aus Wohnungsbränden abgeleitet und ist ein Modell für einen vollentwickelten Brand in einem Raum. Die im umfassenden Regelwerk (z. B. Önorm EN 13501-2) genormte ETK wird mathematisch beschrieben mit der Formel:

$$T - T_0 = 345 \log(8t + 1)$$

Darin sind:

T Braundraumtemperatur in °C

T₀ Braundraumtemperatur bei

Versuchsbeginn in °C

t Prüfbranddauer in min

Eine Übertragung dieser idealisierten Einheits-Temperaturkurve auf reale (Baustellen-) Brände ist nur stark eingeschränkt möglich. Der natürliche Ablauf von Bränden bzw. Schadensfeuern umfasst mehrere Phasen (Bild 2), so neben der Vollbrandphase auch die Phase der Brandentstehung bzw. -entwicklung. Im Vergleich dazu wird

Bild 1
Brandspuren in einer Wiener Dachboden- bzw. Aufstockungs-Baustelle. Der durch Schweissarbeiten verursachte Brand konnte nach ca. 15 Minuten in der Anfangs- bzw. Entwicklungsphase des Brandes gelöscht werden.





Ein Großbrand, ausgelöst durch Flämmlarbeiten, zerstörte am 16. August 2001 die Sofiensäle. Brandschutz auf Baustellen war schlagartig ein Top-Thema.

bei der ETK jedoch lediglich der Zeitraum vom Beginn des Vollbrandes bis hin zum vollentwickelten Schadenfeuer in Rechnung gestellt (Bild 2).

Grundsätzlich können bei einem Schadenfeuer vier Brandphasen unterschieden werden. Diese Phasen können unterschiedlich lang sein oder unter Umständen gar nicht auftreten. So kann z. B. die Schwelbrandphase wenige Minuten oder viele Stunden dauern. In Tabelle 1 sind die charakteristischen Temperaturbereiche und Brandleistungen der Brandphasen eines Schadenfeuers zusammengefasst (wenn kein Löschversuch unternommen wird).

In der Anfangsphase eines Brandes dem Entwicklungsbrand findet die Entzündung statt und der Brand breitet sich über den Zündbereich hinaus immer weiter aus. Diese Phase ist charakterisiert durch kleine Brandflächen und meist noch kleine Brandleistungen (s. auch Tabelle 1). Diese Brände sind in der Regel noch nicht sehr gefährlich aber können sich bei ungehinderten Brandausbreitung bis zu einem Vollbrand entwickeln, denn bei weitere

Entzündung zusätzlicher Oberflächen in einem Raum steigt die Brandfläche und damit die Brandleistung und die Temperatur im Brandraum. Bei Temperaturen von 500-600° C unterhalb der Decke eines vom Brand betroffenen Raumbereiches ist ein Flash-Over, d.h. eine schlagartige bzw. unter Umständen explosionsartige Brandausbreitung mit ca. 5,0 m/min zu erwarten („Rauchgasentzündung“).

Die Entwicklung eines Schadenfeuers hängt von einer Reihe an Faktoren ab z. B. von der Art der brennbaren Stoffe, der Zündquelle, der Verteilung der Brandlast, der Ventilation des betroffenen Raumes, den verwendeten Baustoffen aber auch dem Verhalten der betroffenen Personen. Aufgrund der Vielzahl der zu berücksichtigenden Parameter ist es daher praktisch kaum möglich, das zu erwartende reale Schadenfeuer theoretisch exakt vorherzubestimmen.

Brandausbreitung in der Brandanfangsphase

Die Brandausbreitung kann auch als ein Prozess der fortschreitenden Ent-

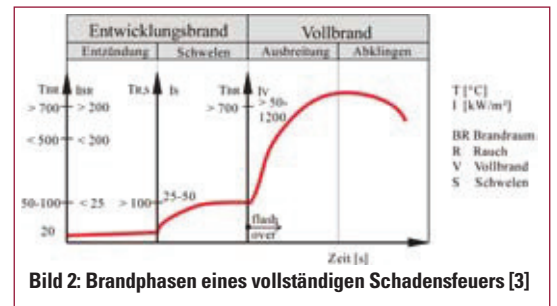


Bild 2: Brandphasen eines vollständigen Schadenfeuers [3]

zündung gesehen werden. Sie wird allgemein als die räumliche Ausweitung eines Brandes über die Brandausbruchsstelle hinaus verstanden, definiert durch eine wandernde Flammenfront im Bereich der (pyrolysierenden) Feststoffoberfläche.

Die Brandausbreitung läuft in der Regel in vier Phasen ab [8]:

1. **Verdampfung:** infolge eines Wärmeintrags auf der Oberfläche durch eine Flamme oder eine externe Wärmequelle beginnt die Oberfläche des Feststoffes oder der Flüssigkeit Pyrolysegase freizusetzen.
2. **Vermischung:** Die Pyrolysegase bzw. die brennbaren Dämpfe oder Gase vermischen sich mit dem Sauerstoff der Umgebung.
3. **Verbrennung:** Im Bereich des richtigen Mischungsverhältnisses zwischen Sauerstoff und Pyrolysegasen verbrennen diese unter Bildung einer Diffusionsflamme.
4. **Erwärmung:** Durch die Diffusionsflamme wird die bis dato unverbrannte Oberfläche bis zur Zündtemperatur erwärmt. Dann beginnt in diesem Bereich wieder Phase 1.

Tabelle 1

| Brandphase | Temperaturbereich in °C | Brandleistung in kW/m² |
|-------------|-------------------------|------------------------|
| Entzündung | 20-50 | < 25 |
| Schwelen | 50-150 | 25-50 |
| Ausbreitung | 500-1250 | 50-1200 |
| Abklingen | 500-20 | < 200 |

Brandphasen eines vollständigen Schadenfeuers ohne Löscheinwirkung [3]

Die Brandausbreitung auf brennbaren Oberflächen ist also das Ergebnis einer komplexen Interaktion zwischen dem Wärmetransport von der Flamme zur unverbrannten Oberfläche, der Entzündung des brennbaren Luft/Gas-Gemisches durch die Flamme und den anschließenden chemischen Reaktionen in der Gasphase unter Abgabe von Wärmeenergie. Alle Faktoren greifen ineinander, beeinflussen sich gegenseitig und können gleichzeitig wichtig für den Brandausbreitungsprozess sein.

Die Brandausbreitung ist abhängig von externen Einflüssen wie etwa dem Wärmefluss auf die Oberfläche, aber auch von den Materialkennwerten, d.h. von chemischen und physikalischen Stoffeigenschaften. Tabelle 2 fasst die wesentlichen Einflüsse auf die Brandausbreitung zusammen.

Je nach Lage (Decke, Wand, Boden), Orientierung (aufwärts, abwärts) und externen Einflüssen auf die Brennstoffoberfläche (z. B. Ventilation) können bei einer Brandausbreitung unterschiedliche Strömungsbedingungen vorherrschen. In Bezug auf diese Strömungsbedingungen kann die Brandausbreitung auch nach folgenden zwei Arten unterschieden werden:

- Brandausbreitung mit gleichlaufender (Luft-) Strömung, und
- Brandausbreitung mit gegenläufiger (Luft-) Strömung.

Bei der Brandausbreitung mit gleichlaufender Strömung haben der Brand und die vorherrschende Strömung die gleiche Richtung (Bild 3 a), und bei der Brandausbreitung mit gegenläufiger Strömung breitet sich der Brand entgegen gesetzt zur vorherrschenden Strömung aus (Bild 3 b.). Die beiden

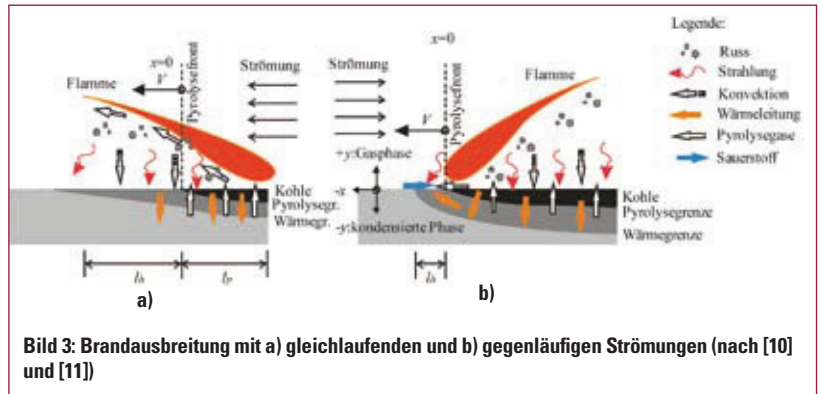


Bild 3: Brandausbreitung mit a) gleichlaufenden und b) gegenläufigen Strömungen (nach [10] und [11])

Brandausbreitungsarten unterscheiden sich in der Qualität und Quantität der Stoff- und Energietransporte während des Brandausbreitungs Vorganges.

Bei einer gleichlaufenden Strömung (Bild 3 a) gibt es bei der Brandausbreitung eine ausgeprägte Pyrolysefläche l_p und auf der unverbrannten Oberfläche wird eine Fläche l_h durch die Flammen vorgewärmt. Wärmestrahlung und Konvektion wirken von und durch die Thermik der Flammen auf die Oberfläche vor der Flammenfront und auf die brennende Oberfläche. Die Wärme wird mittels Wärmeleitung weiter ins Innere des Feststoffes geleitet. Die Flammen liegen eng an der Oberfläche an. Die Brandausbreitungsgeschwindigkeit ist in der Regel schneller als bei gegenläufiger Strömung.

Bei gegenläufiger Strömung (Bild 3 b) ist die bei einer Brandausbreitung durch die Flammen vorgewärmte Fläche l_h geringer und die Wärmeübertragung erfolgt vor allem durch die Strahlung und durch die Wärmeleitung innerhalb des Feststoffes. Die Wärme der Flamme wirkt hauptsächlich auf die brennende Oberfläche, dadurch kommt es zu einer stärkeren Erwärmung des

Feststoffes und durch die Wärmeleitung ins Innere zu einem schnelleren Abbau der Materialoberfläche. Durch eine begrenzte, reduzierte Sauerstoffzufuhr von vorne kann es zu einer Einschränkung der Brandausbreitung kommen, da weniger Sauerstoff für eine brennbare Mischung mit den Pyrolysegasen zur Verfügung stehen kann.

Einfluss der Lage auf die Brandausbreitung in der Brandanfängsphase

Auf Grund der geometrischen Lage kann, bei natürlicher Konvektion mit Einschränkung, bereits auf eine gegenläufige oder gleichlaufende Brandausbreitung geschlossen werden. So kann etwa bei einer horizontalen brennenden Fläche oder einem vertikal abwärtswandernden Brand in der Regel eine gegenläufige, bei einem vertikal aufwärtswandernden Brand eine gleichlaufende Brandausbreitungsrichtung angenommen werden. Somit ist bei horizontalen oder vertikalen Flächen die Brandausbreitungsrichtung in der Regel vorhersagbar. Bei geneigten Flächen verändert sich die Brandausbreitungsart von gegenläufig (horizontale Oberfläche) zu gleichlaufend (vertikale Oberfläche) und vice versa. Die genaue Position (Neigung) des „Umspringens“ von einer Brandausbreitungsart zur anderen ist dabei schwer zu definieren.

Die folgenden Bilder zeigen Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen zur Entwicklung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit an thermisch dünnen Materialien (Bild 4) und am thermisch „dicken“ PMMA (Bild 5) in Abhängigkeit von der Neigung. Die Untersuchungen wurden an kleinen Proben (Breiten 4 bis 10 cm) durchge-

Tabelle 2: Einflüsse auf die Brandausbreitung [9]

| Material | | Umgebungseinflüsse |
|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Chemisch | Physikalisch | |
| Zusammensetzung/Art des Brandgutes | Zündtemperatur | Zusammensetzung der Luft |
| Brandverzögerer | Orientierung der Oberfläche | Luftdruck |
| Brandbeschleuniger | Brandausbreitungsrichtung | Temperatur |
| | Dicke | Strahlung |
| | Wärmekapazität | Konvektion |
| | Wärmeleitfähigkeit | Luftgeschwindigkeit |
| | Dichte | Strömungen |
| | Geometrie | |

Einflüsse auf die Brandausbreitung [9]

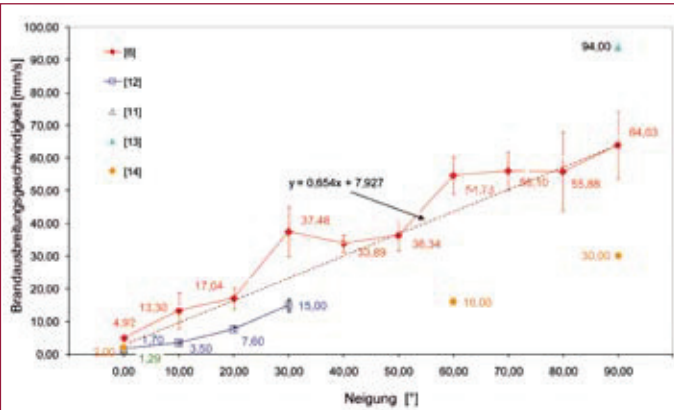


Bild 4: Aufwärts wandernde Brandausbreitungsgeschwindigkeit auf thermisch „dünnen“ Materialien (z.B. Zellulose), in Abhängigkeit von der Probenneigung

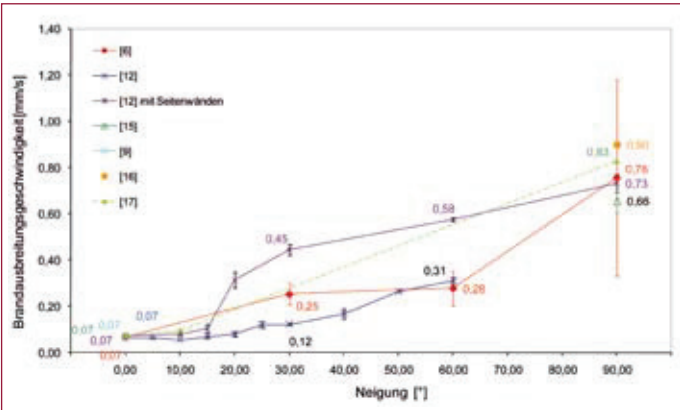


Bild 5: Aufwärts wandernde Brandausbreitungsgeschwindigkeiten auf Polymethylmethacrylat PMMA (Acrylglas, „Plexiglas“) in Abhängigkeit von der Neigung

führt, die Brandflächen und die Ergebnisse würden daher am ehesten einer Anfangsphase eines Brandes entsprechen. Dargestellt wurden die Mittelwerte und die Standardabweichungen unter der Annahme von Normalverteilungen.

Bei Untersuchungen mit dünnen Materialien (z. B. Isolierschichten, Abdeckungen, etc.) wurde eine Steigerung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit mit einer Zunahme der Oberflächenneigung um fast das 20fache ermittelt. Die Brandausbreitungsgeschwindigkeiten stiegen mit zunehmender Oberflächenneigung erwartungsgemäß an. Bei den aktuellen Studien an der TU Wien [6] konnte hier ein annähernd linearer Anstieg von $y = 0,657x + 4,92$ ermittelt werden. Ausnahmen bildeten die Ergebnisse bei 30° und 60°, denn in diesen Bereichen wurden punktuell stärkere Anstiege der Geschwindigkeiten ermittelt.

Versuche, mit deren Hilfe die Brandausbreitungsgeschwindigkeit über die gesamte Neigungsbreite, von horizontal bis vertikal, und mit einem dünnen Material, untersucht wurde, sind in der Literatur kaum zu finden ([6],[12],[14]). Ein direkter Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit Daten aus der Literatur ist schwierig, vor allem durch die unterschiedlichen dünnen Materialien, die zur Anwendung kamen und da sich auch die Versuchsaufbauten (Datenermittlung etc.) der Untersuchungen unterschieden. Und gerade bei Geschwindigkeiten wie hier im Bereich von mm pro Sekunden können auch schon die oft subjektiven Auswertungen große Auswirkungen auf die ermittelten Ergebnisse haben, aber in der Realität eines

Brandes haben sie keinen sehr großen Einfluss.

Auch bei Untersuchungen an 5-6mm dickem PMMA konnte eine Steigerung, hier um das bis zu 17 fache bei einer Veränderung der Oberflächenneigung von horizontal zu vertikal ermittelt werden. Hier war auch der Einfluss von Strömungen auf die Brandausbreitungsgeschwindigkeit zu erkennen, denn Untersuchungen in [12] zeigen, dass ab einer Neigung von 20° bereits 2 cm hohe Seitenwände Auswirkungen auf die Entwicklung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit haben können. Hier kam es etwa zu einer rapiden Steigerung der Geschwindigkeit bis zu einer Neigung von etwa 30°.

Zusammenfassung und Ausblick

Da sich Baustellen täglich mit dem Baufortschritt ändern gibt es eigentlich keinen Regelbetrieb. Der Brand-Schutz auf Baustellen kann sich daher je nach Ausbaufortschritt vom Endzustand merklich unterscheiden. Die Klassifikationen und Prüfungen der Baustoffe decken nicht alle ungünstigen Lastfälle im Bauzustand ab, denn dort sind durch das Handhaben, Lagern und Verarbeiten der (Bau)Materialien zusätzliche/andere Zündquellen und Brandlasten zu erwarten. So kann bereits z. B. bei unsachgemäßer Lagerung zur Begünstigung der Brandausbreitung kommen. Die hier dargestellten Untersuchungen zeigten, dass z. B. die Neigung von 30° und 60° im Hinblick auf das Brennen als kritisch bewertet werden können. Im Bereich von 24-30° beginnen die Flammen teilweise an der Oberfläche anzuliegen und im Bereich von 60° liegt die Flamme bereits so nahe an der Oberfläche, dass die Auswirkungen de facto der einer kom-

plett anliegenden Flamme entsprechen. Die Ergebnisse sind in diesen beiden Neigungsbereichen sehr sensibel in Bezug auf eventuelle Fluktuationen der Flamme und vor allem auf äußere Strömungseinflüsse (Längs-, Querströmungen) und können eine Beschleunigung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit ergeben. ■

Literatur

[1] Schneider, U., Franssen, J., Lebeda, C.: Baulicher Brandschutz. 2. Auflage, Bauwerk Verlag, Köln, 2008.
 [2] Delic, A.: Brandschutz von Industriebauten der Papier- und Verpackungsindustrie im EU Raum, Dissertation, TU Wien, 2011
 [3] Schneider, U.: Ingenieurmethoden im Brandschutz. 2. Auflage, Werner Verlag, Köln, 2009.
 [4] Fernandez-Pello, A.C.: The Solid Phase. in Combustion Fundamentals of Fire (ed. G. Cox) Academic Press, London, 1995.
 [5] Elam, S., Altenkirch, R., Saito, K., Arais, M.: Cone Heater Ignition Tests of Liquid Fuels. Fire Safety Journal, 16,S. 65-84, 1990.
 [6] Schjerve, N.: Beiträge zur Entzündung und Brandausbreitung – Experimente, Modellierung und CFD-Simulationen, Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, Saarbrücken, 2011.
 [7] Quintiere, J.G.: Fundamentals of Fire Phenomena. John Wiley & Sons, Chichester, 2006.
 [8] Hasemi, Y.: Surface Flame Spread. The SFPE handbook of Fire Protection Engineering, fourth edition, 2008.
 [9] Drysdale, D.D.: An Introduction to Fire Dynamics. 2nd edition, John Wiley & Sons, Chichester , 1998.
 [10] Ito, A., Kudo, Y., Oyama, H.: Propagation and extinction mechanism of opposed-flow flame spread over PMMA for different sample orientations. Combustion and Flame, 142, S. 428-437, 2005.
 [11] Zhou, L.: Solid Fuel Flame Spread and Mass Burning in Turbulent Flow. NIST-GCR-92-602, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1991.
 [12] Drysdale, D.D., Macmillan, A.: Flame Spread on Inclined Surfaces. Fire Safety Journal, 18, S. 245-254, 1992.
 [13] Shih, H.-Y., Wu, H.-C.: An Experimental Study of Upward Flame Spread and Interactions Over Multiple Solid Fuels. Journal of Fire Sciences, 26,S. 435-453, 2008.
 [14] Quintiere, J.G.: The Effect of Angular Orientation on Flame Spread over Thin Materials. Fire Safety Journal, 36, S. 291-312, 2001.
 [15] Pizzo, Y., Consalvi, J., Querre, P., Coutin, M., Porterie, B.: With effects on the early stage of upward flame spread over PMMA slabs: Experimental observations. Fire Safety Journal, 44, S. 407-414, 2009.
 [16] Qian, C.: Turbulent Flame Spread on vertical Corner Walls. NIST-GCR-95-669, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1995.
 [17] Ito, A., Kashiwagi, T.: Characterization of Flame Spread over PMMA using Holographic Interferometry Sample Orientation Effects. Combustion and Flame, 71, 1988.