

# Was ist Strömung?

## 1 Einleitung

Das RLWF-Bewertungsmodell wurde Anfang der 2000er Jahre durch den Australier Shan Raffel eingeführt (sh. Artikel 33). Nach intensiven Diskussionen mit Kollegen und unter Einfluss des Amerikaners Ed Hartin wurde das Modell um den Buchstaben G (für Gebäude) erweitert. Dieses Modell wird in der Literatur oft als "Lektüre des Feuers" bezeichnet. Es handelt sich um eine Verfahrensweise, die es den Feuerwehrleuten ermöglicht, vor Ort festzustellen, mit welcher Art von Brand sie es zu tun haben. G-RLWF steht für Gebäude – Rauch – (Luft)Strömung – Wärme (Temperatur) – und Flammen. In diesem Artikel soll der Faktor Strömung näher betrachtet werden.

## 2 Strömung

### 2.1 Warum entsteht eine Strömung im Rauch?

#### 2.1.1 Buoyancy oder die Archimedeskraft

Strömungslehre ist ein sehr komplexes Thema, bei dem viele physikalische Parameter berücksichtigt werden müssen. In den nachfolgenden Zeilen wird daher versucht, in einer einfachen Schreibform zu erklären, welche Strömungsvorgänge sich während eines Brandereignisses abspielen.

Während eines Brandes spielt der Brandherd eine überaus bedeutende Rolle. Der Brandherd produziert Rauchgase, deren Temperatur höher liegt, als die Umgebungswärme. Es ist allgemein bekannt, dass Dinge, die aufgewärmt werden, die Tendenz haben, sich auszudehnen. Bei festen und flüssigen Stoffen bleibt die Ausdehnung eher begrenzt. Bei gasförmigen Stoffen hingegen führt ein Temperaturanstieg dazu, dass die Gase sich sehr stark ausdehnen. Durch die Volumenzunahme verringert sich die Dichte des Stoffes. Das bedeutet, dass das Gewicht der Gase abnimmt. Rauchgase mit einer Temperatur von 315 °C weisen eine nur noch halb so große Dichte auf, als die der Luft bei 20 °C. Jeder weitere Anstieg der Temperatur sorgt dafür, dass die Dichte des Stoffes sich immer mehr verringert.

Warum wird der unterschiedlichen Dichte nun eine so große Bedeutung beigemessen?

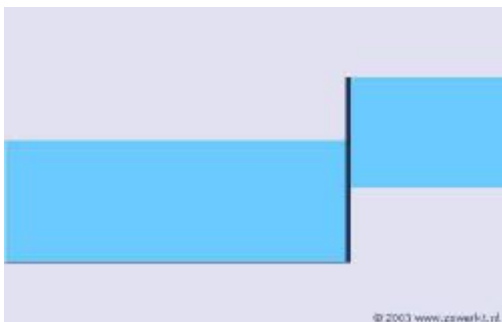
Um dies zu veranschaulichen bedarf es eines Gedankenexperimentes. Dazu stellt man sich ein mit Wasser gefülltes Becken vor. Wenn man nun ein Tischtennisbällchen nimmt, dieses bis auf den Boden des Beckens drückt, und anschließend los lässt, wird das Bällchen sofort bis zur Wasseroberfläche aufsteigen. Der Grund für den Aufstieg ist der Unterschied zwischen der Dichte des Bällchens und der des Wassers. Das Wasser übt eine Kraft auf das Bällchen aus, die so genannte Archimedeskraft. Diese Kraft in Richtung der Oberfläche entspricht dem Volumen des Bällchens und dem Unterschied der Dichte von Wasser und Bällchen. Angesichts dessen, dass das Bällchen viel leichter ist, als das Wasser, in dem es sich befindet, steigt es auf.

Da der Rauch durch die Erhitzung eine geringere Dichte aufweist, als die Umgebungsluft, steigt er auf. Während dieses Vorgangs vermischt er sich mit der Umluft. Diese Vermischung sorgt dafür, dass die Temperatur der Rauchgase wieder abnimmt. Durch die Abkühlung verringert sich auch der Unterschied in der Dichte, was wiederum zur Folge hat, dass die Aufstiegskraft abnimmt. Ab dem Zeitpunkt, an dem der Rauch auf die Temperatur der Raumluft abgekühlt ist, wird er nicht mehr weiter steigen sondern auf dieser Höhe verbleiben. In Räumen, in denen viele Raucher anwesend sind, kann man dieses Phänomen manchmal beobachten.

Anders als bei dem Beispiel des Tischtennisbällchens geht es sich bei einem Brand nicht um ein einzelnes Teilchen, sondern um einen kontinuierlichen Massenstrom von Rauchteilchen. Und im Gegensatz zum Wasserbecken gibt es hier auch keine Flüssigkeitsoberfläche. Die Zimmerdecke begrenzt den Raum in der Höhe. Der Rauch kann daher nicht unendlich weit aufsteigen. Die Situation lässt sich vergleichen mit dem Loslassen von dutzenden Tischtennisbällchen auf dem Grund eines Aquariums. Nach Ablauf einiger Zeit werden die Bällchen die an der Decke ankommen, die dort bereits vorhandenen Bällchen seitlich verdrängen. Das Gleiche passiert bei der Rauchströmung. Die Rauchgase stauen sich unter der Zimmerdecke und werden durch immer mehr nachfolgende Teilchen gezwungen sich entlang der Zimmerdecke auszubreiten.

### 2.1.2 Druckunterschiede

Eine andere mögliche Betrachtungsweise von Strömung ist das Studieren der Druckunterschiede zwischen zwei Bereichen. Ein bekanntes Beispiel dazu ist ein Staudamm. Bei einem Staudamm sorgt die Staumauer dafür, dass das Wasser an einer



**Bild 1** Schematische Darstellung eines Staudamms

Seite höher steigen kann, als an der anderen. Das führt dazu, dass der Druck an der einen Seite der Staumauer höher ist, als auf der anderen. Unter der Wasseroberfläche kann eine Rohrleitung geöffnet werden, wodurch ermöglicht wird, dass Wasser von einer Seite des Damms zur anderen strömt. Das Wasser wird immer vom Hochdruckbereich in den Bereich mit dem niedrigeren Druck abfließen. Die Strömung wird dabei den Druckunterschied ausgleichen. Die Strömung wird solange anhalten, bis kein Druckunterschied mehr vorhanden ist. Je höher

der Druckunterschied ist, umso heftiger wird die Strömung sein.

Das gleiche Phänomen lässt sich auch bei Gasen beobachten. Die Pressluftflasche ist dafür ein Beispiel, das bei der Feuerwehr hinlänglich bekannt sein dürfte. In einer Pressluftflasche befindet sich Luft, die unter hohem Druck komprimiert wurde. Der Flaschendruck ist vielfach höher, als der Umgebungsdruck. Wenn die Flasche geöffnet wird, entsteht eine Öffnung, durch die der Überdruck entweichen kann und die Luft wird unter hohem Druck ausgeblasen. Die Strömungsgeschwindigkeit ist sehr hoch und der Luftstrom erzeugt ein lautes Geräusch. Das liegt daran, dass der Unterschied zwischen Flaschendruck und Atmosphärendruck so groß ist. Nachdem mehr und mehr Luft ausgetreten ist, vermindert sich der Flaschendruck, die Strömungsgeschwindigkeit verringert sich und auch das Geräusch nimmt ab. Die Strömung wird anhalten, bis ein Druckausgleich zwischen dem Flaschendruck und dem atmosphärischen Druck der Umgebung stattgefunden hat.

Auch bei einem Brand, bei dem in einem Bereich ein Überdruck entstanden ist, wird eine Strömung einsetzen, sobald eine Öffnung geschaffen wird. Die Natur versucht auf diese Weise den Druckunterschied auszugleichen.

## 2.2 Was geschieht anschließend?

Die weitere Entwicklung des Feuers ist abhängig vom Ausmaß des Brandherdes. Wenn sich der Brand ausbreitet, wird die Brandleistung, also die freigesetzte Energiemenge, zunehmen. Im Verhältnis dazu wird sich auch die Menge der produzierten Rauchgase erhöhen.

Karlsson & Quintiere beschreiben in ihrem Buch "Enclosure fire dynamics" den Brandverlauf. Der Umschreibung ist sehr schematisch gehalten, steht aber in einem guten Bezug zur Wirklichkeit. Sie beschreiben vier verschiedene Druckprofile, die ein Brand durchläuft, von der Entstehung bis zum Vollbrand. Während der Entstehungsphase des Feuers wird durch die heißen Rauchgase ein Überdruck im Raum erzeugt. Die Gase wollen sich ausbreiten, werden aber durch die anwesende, kühlere Luft daran gehindert. Dadurch entsteht ein leichter Überdruck. Dieser kann über eine möglicherweise vorhandene Öffnung abgebaut werden.

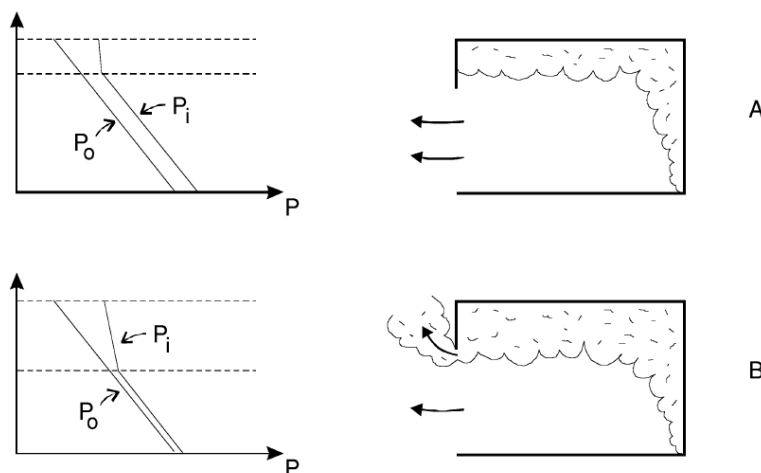


Bild 2, **Druckprofil A** zeigt die Darstellung der Situation in der Entstehungsphase eines Brandes. Der Brandherd produziert Rauchgase, die zur Decke aufsteigen, sich dort ansammeln und zu einer kleinen Rauchsicht formieren.

Der Brand erzeugt somit einen leichten Überdruck. Als Folge dessen wird ein Teil der kühleren Umgebungsluft aus dem

**Bild 2** Druckprofile A und B. (Grafik: Karlsson & Quintiere)

Raum gedrückt. Links von dieser Abbildung findet sich ein Diagramm des Druckprofils. Die horizontale Achse stellt den Druck ( $P$ ) dar. Der Druck nimmt also zu, je weiter man sich auf der Achse nach rechts bewegt. Die vertikale Achse stellt die Höhe dar. Die Linie, die als  $P_0$  bezeichnet wird, markiert den Außendruck (atmosphärischer Druck). Der Atmosphärendruck entsteht durch das Gewicht der Luft, das auf die Erde lastet. Desto höher man geht, desto steiler wird die Linie. Das liegt daran, dass der Luftdruck mit zunehmender Höhe abnimmt. Der Neigungswinkel der Linie ist natürlich stark übertrieben, ansonsten wäre die Zeichnung weniger deutlich. Der Druck im Raum wird von der als  $P_i$  bezeichneten Linie dargestellt. Die Linie  $P_i$  steht weiter rechts, daraus wird ersichtlich, dass der Druck im Rauminnen etwas über dem Außendruck liegt. Es ist ebenfalls deutlich erkennbar, dass die beiden Linien größtenteils parallel zueinander verlaufen. Das ergibt sich daraus, dass die Luft im Raum noch die gleiche Temperatur hat, wie die Außenluft und der Druck daher im Verhältnis zur Höhe ab- oder zunimmt, und sich somit gleich verhält, wie der Luftdruck außerhalb des Raumes.

An dem Punkt, an dem die Linie  $P_i$  die Rauchschrift erreicht, biegt sie jedoch ab. In der Rauchschrift liegt die Temperatur viel höher als die Temperatur der Umgebungsluft. Die Dichte des Rauches ist niedriger, was bedeutet, dass der Rauch weniger wiegt, als die Luft, die ihn umgibt. In dieser Umgebung nimmt der Druck bei zunehmender Höhe nicht mehr so schnell ab.

Wenn der Brand dazu übergeht sich auszubreiten, treten verschiedene Abläufe ein. Die Rauchschrift wird absinken, wodurch der Punkt, ab dem die Linie  $P_i$  einen anderen Verlauf nimmt, nach unten verlagert wird. Der Überdruck nimmt ab, weil jetzt größere Mengen Luft durch die Türöffnung aus dem Raum gedrückt werden. Die Linie  $P_i$  verschiebt sich nach links und nähert sich der Linie  $P_o$ . Diese Letztere stellt den Außendruck dar und bleibt während des gesamten Brandereignisses unverändert. In der Konsequenz: Ein Brand beeinflusst nicht die atmosphärischen Bedingungen außerhalb des Brandobjektes.

In der Folge kommt ein zweites Druckprofil zustande, nämlich dann, wenn die Rauchschrift die Höhe der Türe unterschreitet. Dieses **Druckprofil B** besteht nur während eines sehr kurzen Zeitraumes. In dieser Zeit strömen sowohl kalte Luft, wie auch heiße Brandgase durch die Türöffnung aus dem Raum. Dadurch wird der Überdruck im Rauminnenen komplett ausgeglichen und ist praktisch nicht mehr existent. Das ist allerdings nur eine Art von kurzer Übergangsphase, die lediglich erwähnenswert ist, um zu begreifen, welche Vorgänge stattfinden.

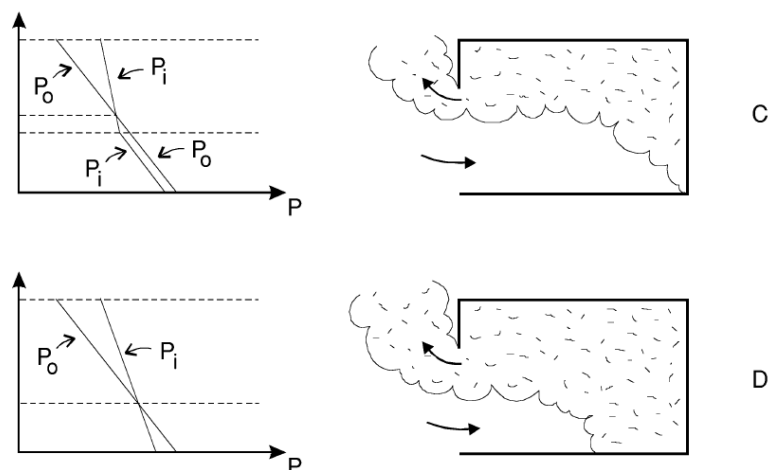
### 2.3 Die Ausbreitungsphase und die Vollbrandphase

Der Brand ist mittlerweile in der Ausbreitungsphase angekommen. Die Rauchschrift ist bereits erheblich abgesunken während die Temperatur innerhalb der Rauchschrift stark angestiegen ist. Der Brandherd benötigt jetzt sehr viel Sauerstoff und verbraucht daher große Mengen Luft. Die anwesende Raumluft kann diesen Anforderungen nicht mehr nachkommen und das Feuer beginnt Luft von draußen anzusaugen. Es entsteht **Druckprofil C**.

Die Linie  $P_i$  (der Druck im Rauminnenen) ist weiter nach links gerückt. Anhand der vertauschten Positionen der Linien ist zu erkennen, dass, jeweils am Boden betrachtet, der Außendruck nun höher ist, als der Druck im Inneren des Brandobjektes.

Da die Rauchschrift weiter abgesunken ist, ändert die Linie  $P_i$  ihre Richtung jetzt

viel näher zum Boden als noch im Druckprofil B. Es lassen sich nun deutlich zwei Zonen unterscheiden. Als erstes die Zone unterhalb der Rauchschrift, in der die Temperatur ungefähr mit der Außentemperatur übereinstimmt und in der die Linien immer noch parallel zueinander verlaufen. Dies, weil die Dichte von Raum- und Außenluft gleich ist und der Luftdruck sich daher in beiden Fällen proportional zur Höhe verhält.



**Bild 3** Druckprofile C und D (Grafiek: Karlsson & Quintiere)

Durch den Umstand, dass der Druck im Raum niedriger ist, als der Außendruck, kommt eine Luftströmung von draußen nach drinnen in Gang. Die Luft „fließt“ dorthin, wo der Druck am geringsten ist. Das ist die Luftströmung, die das Feuer speist.

Die zweite Zone bildet die Rauchdecke. In der Rauchdecke verändert die Linie  $P_i$  ihren Verlauf. Das bedeutet, dass der Unterschied zwischen Außen- und Innendruck abnimmt. An einem bestimmten Zeitpunkt kreuzen sich die beiden Linien, bei dieser Position sind der Druck im Raum und der Druck außerhalb auf dem gleichen Wert. Das ist die neutrale Grenzschicht, wo sich die Brandgase mit dem Luftsauerstoff vermischen. Im Normalfall liegt die neutrale Grenzschicht etwa zehn Zentimeter oberhalb der Unterseite der Rauchdecke, also in der Rauchdecke. Für Feuerwehrleute ist dieses Detail jedoch nicht von allzu großer Wichtigkeit. In der Praxis ist die Unterseite der Rauchdecke eine gute Richtlinie, um die Position der neutralen Grenzschicht zu bestimmen.

Oberhalb der neutralen Grenzschicht setzen beide Kurven ihren Weg fort. Dadurch entstehen erneut andere Druckverhältnisse. Der Druck in der Rauchsicht ist höher als der Druck außerhalb des Brandobjektes. Dieser Druckunterschied nimmt proportional zur



**Bild 4** Gegenläufige Strömung bei einem Zimmerbrand. Rauch tritt aus dem oberen Teil der Türöffnung aus, Luft strömt unten ein.  
(Foto: Nico Speleers)

Höhe immer weiter zu. Man kann also sagen, dass der Druck immer weiter ansteigt, je höher man sich oberhalb der neutralen Grenzschicht befindet. Dies steht im Gegensatz zur Situation in der ersten Zone unterhalb der neutralen Grenzschicht, wo der Druck, unabhängig von der Höhe, konstant bleibt. Der Ausstoß der Rauchgase erfolgt daher oberhalb der neutralen Schicht.

Die Strömungsgeschwindigkeit mit der die heißen Rauchgase den Raum verlassen erhöht sich im Verhältnis zu deren Temperatur und zur Höhe auf der sie ausströmen. Im Klartext bedeutet das, je heißer die Gase sind und je weiter oberhalb der neutralen Grenzschicht sie ausströmen, desto größer wird der Druck, respektive der Druckunterschied, sein, der wiederum

die Strömungsgeschwindigkeit festlegt. Es entstehen also zwei gegenläufige Strömungen. Während **Druckprofil C** zur Anwendung kommt, wird in der Unterdruckzone unterhalb der neutralen Grenzschicht ein Einstrom von Außenluft und in der Überdruckzone oberhalb der neutralen Schicht, ein Ausstoß von Rauchgasen, erzeugt. Dieses Profil bleibt bis zum Flashover bestehen. Die Zeitspanne bis zum Eintreten des Flashovers ist abhängig von Art und Menge des Brennstoffs und von der Beschaffenheit der Räumlichkeiten. Wie bereits in verschiedenen vorherigen Artikeln angeführt, hat sich diese Zeitspanne in den vergangenen Jahrzehnten sehr stark verringert. Üblicherweise beträgt die Zeit bis zum Flashover mittlerweile nur noch etwa drei bis vier Minuten. In der Praxis können aber die Verteilung des Brennstoffs im Raum und Sauerstoffmangel aufgrund einer zu kleinen Belüftungsöffnung dazu führen, dass dieser Vorgang sehr viel länger dauert.

Nach dem Flashover wird nicht mehr länger von zwei Zonen gesprochen. Der gesamte Raum wird als eine einzige Zone betrachtet, in der nahezu überall die gleiche Temperatur herrscht. Es kann auch nicht mehr länger die Rede von einer Rauchsicht sein. In den Öffnungen wird zwar immer noch der untere Bereich für die Luftzufuhr genutzt aber die Rauchsicht, die während der Ausbreitungsphase noch deutlich zu unterscheiden war, hat nun den gesamten Raum eingenommen und sich anschließend entzündet. Auf Bild 3, D ist das **Druckprofil D** dieser Phase zu sehen. Der Außendruck,  $P_o$ , ist immer noch unverändert. Die Druckverhältnisse im Brandobjekt haben sich dahingegen stark verändert. Aufgrund dessen, dass die Temperatur im gesamten Raum gleich ist, zeigt die Druckkurve keine Krümmung mehr. Die Temperatur im Rauminnen ist bedeutend höher als die Außentemperatur. Das hat zur Folge, dass die Dichte der Gase im Raum sehr viel niedriger ist, als die der Umgebungsluft und sich daher der Druck im Verhältnis zur Höhe nur langsam verringert. Der Punkt, an dem sich die beiden Kurven kreuzen, ist die neutrale Grenzschicht. Dort sind Innen- und Außendruck gleich. Unterhalb dieser Schicht wird Frischluft einströmen, während Rauch (und Flammen) oberhalb der Grenzschicht austreten.

### 3 Praktisch?

Im vorherigen Abschnitt wird erklärt, was Druckunterschiede sind und wie Strömung zustande kommt. Anschließend wurden die verschiedenen Druckprofile, die bei einem Brand in einem geschlossenen Raum entstehen, betrachtet. Es ist möglich diese Kenntnisse auf praktische Weise beim Lesen eines Brandes einzusetzen. Der Weg, den der Rauch nimmt, um vom Brandherd bis nach draußen zu gelangen, wird im Englischen "the flowpath" genannt. Indem die Strömung im „flowpath“ genau observiert wird und diese Beobachtungen mit den Kenntnissen zum Brandverhalten kombiniert werden, kann in den meisten Fällen eine große Menge an Informationen über den Brand gewonnen werden. Es ist wichtig zu erwähnen, dass es sich hier um kleine Räume mit einer Fläche von weniger als 70 m<sup>2</sup> handelt. Die Zimmerhöhe sollte auch weniger als 4 Meter betragen.

#### 3.1 Die Höhe der Rauchsicht

Die Höhe der Rauchsicht sagt einiges darüber aus, wie weit der Brand bereits fortgeschritten ist. Wenn nur wenig Rauch unter der Zimmerdecke zu sehen ist, gilt es als wahrscheinlich, dass der Brand sich noch in der Entstehungsphase befindet. Diese naheliegende Schlussfolgerung darf jedoch nicht als hundertprozentig sicher betrachtet werden! Es wäre auch möglich, dass es eine hochgelegene Belüftungsöffnung gibt. Eine solche Öffnung würde Einfluss auf das klassische Erscheinungsbild haben.

Wenn die Rauchsicht indes bereits einen Meter dick ist, befindet sich der Brand in der Ausbreitungsphase. Aus den jüngsten Untersuchungen geht hervor, dass die Zeit bis zum Flashover eines belüfteten Brandes heutzutage zwei bis vier Minuten beträgt. Die Rauchsicht wird weiter absinken, in dem Maße, in dem sich der Brand in Richtung Vollbrand entwickelt.

Wenn die Rauchdecke bis auf einen Meter über den Boden abgesunken ist, dann muss davon ausgegangen werden, dass ein Flashover unmittelbar bevorsteht. Die Höhenbewegungen der Rauchsicht (und der neutralen Grenzschicht, die etwas darüber liegt) sind dementsprechend ein guter Anhaltspunkt, zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit und des Flashoverrisikos.

### 3.2 Strömungsgeschwindigkeit

Obenstehend wurde erklärt, dass Strömung durch Temperaturunterschiede ausgelöst wird. Je größer der Temperaturunterschied ist, umso höher wird die Fließgeschwindigkeit sein. Wenn der Rauch beginnt sehr schnell zu strömen, werden die Turbulenzen deutlich sichtbar. Indem man die Strömungsgeschwindigkeit betrachtet, kann die Intensität des Brandes beurteilt werden. Bei einer hohen Brandleistung wird mehr Wärme produziert. Das zieht einen großen Temperaturunterschied nach sich, der wiederum für eine schnelle Strömung sorgt.

Es ist daher möglich aus der Strömungsgeschwindigkeit abzuleiten, ob ein Brand stark oder weniger stark entwickelt ist. Auch daraus ergeben sich also Hinweise auf die Phase, in welcher sich der Brand befindet.

### 3.3 Wo befindet sich der Brand?

Die Strömung sagt gleichfalls etwas über den Ort des Brandes aus. Der Rauch strömt sinngemäß vom Brand weg. Wenn man den Rauch beobachtet, kann man (eventuell mithilfe einer Wärmebildkamera) festlegen in welche Richtung er strömt. Wenn man in die entgegengesetzte Richtung vorrückt, findet man logischerweise den Brandherd.

Darüber hinaus ist das Gegenteil auch zutreffend: Wenn die Türe zu einem Raum geöffnet wird und der Rauch steht still, dann steht (oder stand) dieser Raum nicht in direkter Verbindung zum Brandraum.

Natürlich muss man auch der Möglichkeit Rechnung tragen, dass man sich nicht im „flowpath“ befindet, solange die Türe nicht geöffnet wird. Die Strömung wird erst nach dem Öffnen der Türe einsetzen. Diese Vorgehensweise liefert zwar auch Informationen zur Position des Brandherdes aber dabei darf auf keinen Fall außer Acht gelassen werden, dass diese neue Strömung den Brand mit zusätzlichem Sauerstoff versorgt.

## 4 Quellennachweis

- [1] *Enclosure fire dynamics*, Bjorn Karlsson & James Quintiere, 2000
- [2] *Binnenbrandbestrijding*, Koen Desmet & Karel Lambert, 2008 & 2009
- [3] Shan Raffel, [www.cfbt-au.com](http://www.cfbt-au.com)
- [4] Ed Hartin, [www.cfbt-us.com](http://www.cfbt-us.com)

Karel Lambert