

Unterbelüftete Feuer aus der Nähe betrachtet

Es entstehen zurzeit in der Fachwelt ständig neue Studien und Forschungsprojekte, die das Phänomen der unterbelüfteten Feuer zum Thema haben. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass die modernen Feuerwehren heutzutage immer öfter mit dieser Art von Bränden konfrontiert werden. Indem wir die Ergebnisse dieser weltweiten Untersuchungen studieren, können wir eine Menge über das Verhalten solcher Brände lernen. In diesem Artikel werden wir uns daher das Brandverhalten von unterbelüfteten Feuern genauer ansehen.

1 Was ist der Unterschied zwischen einem belüfteten und einem unterbelüfteten Feuer?

Wenn ein Feuer in einem Gebäude mit normaler Brandlast ausbricht, wird der Brand irgendwann von der Luftzufuhr kontrolliert. In der Konsequenz bedeutet dies, dass die Brandintensität in diesem Fall abhängig ist, vom Volumen des zugeführten Sauerstoffs.

1.1 Der Brandverlauf bei einem belüfteten Feuer

Wenn beispielsweise ein großes Fenster geöffnet ist, dann kann von Beginn an eine bedeutende Menge Frischluft in den Brandraum nachströmen. Dies führt dazu, dass das Feuer sich schnell und stark entwickelt. Da ausreichend Sauerstoff verfügbar ist, spricht man von einem brennstoffkontrollierten Brand. Ein Feuer in einem geschlossenen Volumen, das sich ungestört ausbreiten kann, führt zu einem Flashover. Flashover bedeutet, dass ein Feuer von der Ausbreitungsphase in die Vollbrandphase wechselt. Von diesem Augenblick an nehmen alle im Raum befindlichen Gegenstände an der Verbrennung teil. Daraus resultiert jedoch ein deutlicher Anstieg des Sauerstoffverbrauchs und das Feuer benötigt immer mehr Frischluft. Die Raumöffnungen (Türen und Fenster) können diesem enormen Bedarf an frischer Luft nicht mehr nachkommen. Da immer noch ausreichend Brennstoff vorhanden ist aber nur noch eine begrenzte Menge Sauerstoff zur Verfügung steht, spricht man ab diesem Augenblick von einem sauerstoffkontrollierten Brand. Den Zeitpunkt, in dem ein Feuer von der brennstoffkontrollierten Verbrennungsphase in die sauerstoffkontrollierte Verbrennungsphase übergeht, nennt man in der englischsprachigen Fachliteratur FC/VC Point (FC -> **F**uel **C**ontrolled; VC -> **V**entilation **C**ontrolled)

Wenn ein Feuer während eines Flashovers in die sauerstoffkontrollierte Phase wechselt, spricht man von einem belüfteten Feuer. Es muß hierfür in jedem Fall schon zu Beginn und im weiteren Verlauf des Brandes eine ausreichende und anhaltende Belüftung vorhanden sein, um dem Feuer eine Ausbreitung bis hin zum Flashover zu ermöglichen.

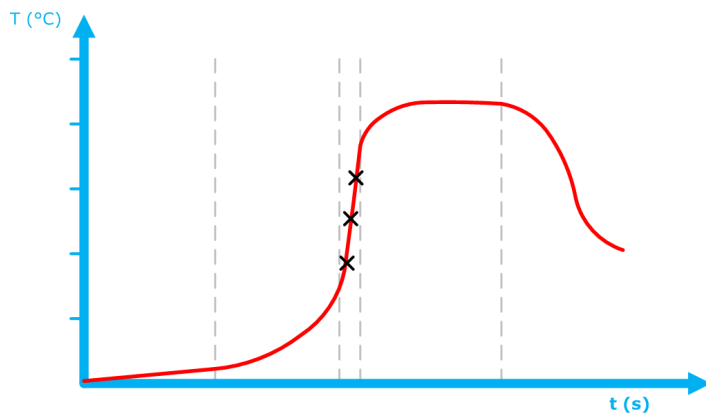


Bild 1 Mögliche Zeitpunkte des FC/VC Punktes in einem belüfteten Feuer. (Graph: Bart Noyens)

Bild 1 zeigt die Graphik eines belüfteten Feuers. Momentan kann man bei dieser Art von Brandverlauf noch nicht mit absoluter Sicherheit den FC/VC Punkt bestimmen. Es wird allgemein davon ausgegangen, dass der Übergang sich irgendwo in der Flashoverphase ereignet, doch niemand ist bisher in der Lage verlässliche Angaben zum genauen Zeitpunkt zu machen. Einige Experten vertreten sogar die Meinung, dass der Übergang bereits früher stattfinden könnte und dass der FC/VC Punkt kurz

vor dem Flashoverphänomen zu finden sei. Dazu vergleichen sie das Wachstum eines Feuers mit einem fahrenden Schiff auf See. Wenn die Maschinen abgeschaltet werden, treibt das Schiff auch ohne Antrieb noch für eine kurze Zeit lang weiter in die eingeschlagene Richtung. Auf das Brandverhalten angewendet, bedeutet dies, dass man von der These ausgeht, dass bereits gegen Ende der Ausbreitungsphase genügend Energie in Form von Hitze im Raum freigesetzt wurde, um einen Flashover zu erzeugen. In der oben gezeigten Graphik markiert jedes ‚x‘ einen möglichen Zeitpunkt für den Übergang vom brennstoffkontrollierten zum sauerstoffkontrollierten Feuer. Für den Brandverlauf eines belüfteten Feuers ist es jedoch nicht von allzu großer Bedeutung, wann genau der Übergang stattfindet. Dahingegen ist es überaus wichtig, dass Feuerwehrleute in der Lage sind, den Unterschied zwischen einem Feuer in der Entwicklungsphase und einem voll entwickelten Brand zu erkennen, denn beide Arten von Brände benötigen jeweils eine andere Löschtaktik.

Abgesehen davon ist es extrem (überlebens)wichtig, dass Feuerwehrleute die Anzeichen eines bevorstehenden Flashover erkennen können :

- Intensive Strahlungshitze aus der Rauchdecke weiter oben
- Dancing Angels in der Rauchdecke als Vorboten des Roll-Over
- Eine Rauchdecke, die schnell nach unten abfällt oder schon sehr tief im Raum steht
- Turbulenzen und Verwirbelungen in der Rauchdecke (wellenartige Bewegungen)
- Die plötzliche einsetzende Pyrolyse von brennbaren Objekten im Raum

1.2 Der Brandverlauf bei einem unterbelüfteten Feuer

Im Gegensatz zum belüfteten Brandverlauf ist es bei einem unterbelüfteten Feuer von größter Wichtigkeit den Zeitpunkt des Überganges FC/VC zu bestimmen. Bei einem unterbelüfteten Brand tritt der Übergang bereits vor dem Flashover ein. Dieser Typ Feuer verfügt nicht über eine ausreichende Luftzufuhr um sich zu einem Flashover zu entwickeln. Das Feuer will zwar der graphischen Kurve eines belüfteten Feuers folgen aber aufgrund des Sauerstoffdefizites wird es zu einer niedrigeren Energieabgabe in Form von Hitze gezwungen (HRR : Heat Release Rate). Um dieses Verhalten besser zu veranschaulichen, bietet sich der Vergleich mit einer Autobahnbaustelle an. In der Regel wird auf Höhe der Arbeiten die zugelassene Geschwindigkeit auf 70 km/h begrenzt. Sobald die Fahrer ein solches Schild sehen, bremsen sie von 120 km/h auf 70 km/h ab. Sie würden zwar gerne schneller fahren, aber



Bild 2 Die Geschwindigkeitsbegrenzung auf 70 km/h an Autobahnbaustellen ist eine passende Analogie zu einem unterbelüfteten Feuer. Das Feuer will stärker brennen, wird aber durch den Luftmangel eingeschränkt

das Schild limitiert die zugelassene Höchstgeschwindigkeit auf 70 km/h. Genauso verhält es sich bei einem unterbelüfteten Brand. Das Feuer würde gerne mehr Energie produzieren und eine höhere Hitzeabgabe erreichen aber der Mangel an Luft limitiert diese Entwicklung.

Die Größe des Raumes und die vorhandene Belüftung bestimmen den Zeitpunkt an dem der Brand vom brennstoffkontrollierten zum sauerstoffkontrollierten Verbrennungsablauf übergeht. Bild 3 zeigt graphisch den Brandverlauf mehrerer unterbelüfteter Feuer im Vergleich zum Brandverhalten eines ausreichend belüfteten Feuers. Man erkennt anhand der Graphik, dass alle Feuer irgendwann in den sauerstoffkontrollierten Zustand wechseln, jedoch erfolgt der Übergang an unterschiedlichen Zeitpunkten. Die grüne Graphik stellt ein Feuer dar, dass sehr früh in ein belüftungskontrolliertes Verhalten wechselt, während man bei der gelben Kurve sieht, dass das Feuer etwas länger im brennstoffkontrollierten Modus verbleibt, was darauf schließen lässt, dass es sich hierbei um eine Situation handelt, bei der von Beginn an mehr Sauerstoff zur Verfügung stand. Dieses Feuer wird sich ungefähr eine Minute länger in der brennstoffkontrollierten Phase aufhalten, bevor der Mangel an nachströmender Frischluft beginnt sein Brandverhalten zu bestimmen. Auch hier stehen die „x“ für den FC/VC Punkt eines jeden dieser Feuer.

Man könnte jetzt die Frage aufwerfen, welches Feuer die größere Gefahr darstellt.

Die Antwort liegt auf der Hand. Das Feuer welches von der gelben Kurve dargestellt wird, wechselt als letztes zum belüftungsabhängigen Verbrennungsablauf. Das bedeutet, dass die Raumtemperatur zum Zeitpunkt des Übergangs FC/VC bei diesem Brand bedeutend höher liegt, als die Temperatur in den beiden anderen dargestellten unterbelüfteten Bränden.

Die Höhe der Raumtemperatur geht einher mit dem Gefahrengrad für Feuerwehrleute. Oder im Umkehrschluß : Ist die Temperatur im Raum sehr niedrig, besteht auch nur ein geringes Risiko für die Feuerwehr. Nehmen wir einmal an, dass die Temperatur des Brandes, der durch die grüne Linie dargestellt wird, nicht die 200 °C überschreitet, dann wird es nicht zu einer massiven Pyrolysereaktion kommen. Es wird nur wenig Pyrolysegas freigesetzt, da im Raum nicht genügend Hitze vorhanden ist, um viele Objekte derart zu erhitzen, dass sie den Temperaturwert erreichen, der die Pyrolyse auslöst.

Die Temperatur, bei der ein Gegenstand zu pyrolysieren beginnt, hängt sehr stark von den verwendeten Konstruktionsmaterialien bei seiner Herstellung ab. Eine gute Faustregel besagt, dass ab einer Temperatur von 300 °C große Mengen an Pyrolysegase freigesetzt werden. Die Objekte, die sich in unmittelbarer Nähe zum Brandherd befinden, werden am schnellsten erwärmt. Diese thermische Aufbereitung geschieht vor allem durch die Strahlungshitze der Flammen des Brandherdes.

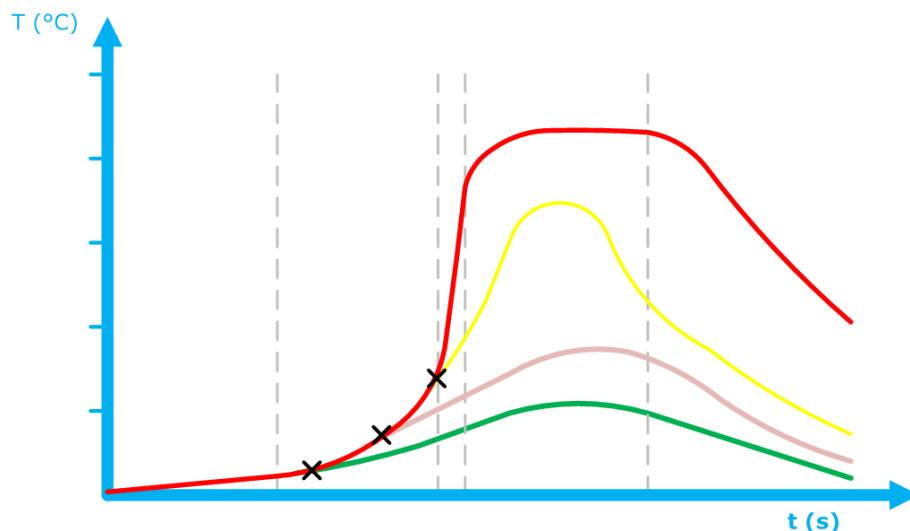


Bild 3 Die rote Kurve stellt die Ausbreitung eines belüfteten Feuers dar. Die anderen drei Kurven veranschaulichen das Verhalten von drei verschiedenen unterbelüfteten Bränden. Die grüne Linie bezeichnet den Brandverlauf in einem stark isolierten, beinahe luftdicht versiegelten Gebäude. Diese Konstruktionsweise bewirkt, dass das Feuer bereits in einem sehr frühen Entwicklungsstadium in den sauerstoffkontrollierten Verbrennungsablauf übergeht. Die rosa Linie zeigt ein Feuer, das ein wenig mehr Luft zur Verfügung hat, während die gelbe Kurve ein unterbelüftetes Brandereignis darstellt, welches erst unmittelbar vor dem Flashover durch die Luftzufuhr kontrolliert wird. (Graph: Bart Noyens)

Erst wenn die Temperatur im Raum auf ein bestimmtes Niveau ansteigt und eine heiße Rauchdecke entsteht, setzt auch bei Objekten, die sich weiter weg vom Brandherd befinden, die Pyrolyse ein. Dieser Prozess wird größtenteils durch die Strahlungshitze eingeleitet, welche die Rauchdecke über ihnen abgibt, aber auch Gegenstände, die in direktem Kontakt mit den heißen Teilchen im Rauch kommen, zum Beispiel durch Umhüllung, werden sofort beginnen zu pyrolysieren, in diesem Fall spricht man von Wärmeübertragung durch Konvektion.

Desto höher die Temperatur in einem geschlossenen Volumen ansteigt, bevor der Brand von der brennstoffkontrollierten in die sauerstoffkontrollierte Brennphase übergeht, desto gefährlicher ist das Feuer. Daher ist die genaue Bestimmung des FC/VC Punktes auf der Kurve der Brandentwicklungsgraphik von höchster Wichtigkeit.

Die Gefahr, die von einem Feuer ausgeht, variiert auch im Verhältnis mit der abgelaufenen Zeit. Bei jedem Brand wird eine gewisse Menge an Energie freigesetzt, im Englischen spricht man diesbezüglich von der Heat Release Rate (HRR). Das bedeutet, dass in einem bestimmten Zeitabschnitt (pro Sekunde) eine bestimmte Menge Energie (ausgedrückt in Joules) produziert wird. Andererseits geht auch Energie verloren.

In einem geschlossenen Volumen wird die Energie meistens aufgrund von Wärmeleitung (Konduktion) durch die Wände abgeleitet. Das besagt im Grunde genommen, dass während eines bestimmten Zeitabschnitts (pro Sekunde) eine bestimmte Energiemenge den Raum verlässt. Das Feuer erzeugt also Energie, während gleichzeitig Energie über die Wände abgeführt wird. Bei einem brennstoffkontrollierten Feuer wird die erzeugte Energiemenge immer größer und die Hitzeabgaberate (Heat Release Rate) des Feuers wird sehr bald höher liegen, als der Energieverlust über die Wände.

Wenn – pro Sekunde – mehr Energie produziert wird, als abgegeben werden kann, dann steigt die Temperatur. Unmittelbar nach dem Übergang am FC/VC Punkt wird die Temperatur noch eine kurze Zeit lang weiter ansteigen. Die Energieproduktion (HRR) des Feuers wird stagnieren und vielleicht sogar abnehmen. Aber es wird einige Sekunden dauern, bevor der Energieverlust durch die Mauern, die Hitzeabgabe des Feuers ausgleichen, bzw. übersteigen kann. Sobald mehr Energie verloren geht als produziert wird, beginnt die Temperatur zu fallen. Auch hier kann der Vergleich mit einem Schiff auf See hilfreich sein, um den Vorgang besser zu veranschaulichen. Auch wenn man den Antrieb durch den Schiffsmotor drosselt, wird das Schiff noch einige Zeit lang vorwärts durchs Wasser gleiten, ehe es signifikant langsamer wird. Und am Anfang wird auch eine verminderte Motorleistung ausreichen um das Schiff weiterhin auf Kurs zu halten. Angewendet auf das Feuer bedeutet dies, dass die Hitzeabgaberate zwar limitiert wurde aber die Temperatur immer noch (verlangsamt) ansteigt. Ungeachtet der Tatsache, dass das Leistungsvermögen des Feuers limitiert wurde, ist es immer noch in der Lage mehr Hitze zu erzeugen, als über die Wände abgegeben werden kann. Das Feuer „hält demnach seinen Kurs“.

Die Geschwindigkeit, mit der die Energie aus dem Raum abgeleitet werden kann, hängt von der Raumtemperatur, der Außentemperatur und von der Temperatur der Wände ab. Darüber hinaus spielen die Eigenschaften des Konstruktionsmaterials eine wichtige Rolle, wie beispielsweise die thermische Leitfähigkeit, die Dichtigkeit und andere spezifisch thermische Kapazitäten. Die Dicke der verschiedenen Lagen in der Wand (z.B. Gips, Backstein, Isolations- und Dämmungsmaterial,...) ist ebenfalls von Bedeutung.

Eine wichtige Frage, die gestellt werden muss, ist :

„Wann sollte die Feuerwehr eine Öffnung schaffen?“

Sobald Feuerwehrleute eine Türe öffnen strömt Frischluft in den Brandraum und Rauch tritt aus. Dieser Austausch kann die Brandintensität und damit die HRR wieder steigern. Umso stärker die Luftströmung ist, umso gefährlicher wird der Brand.

Wirft man einen zweiten Blick auf Bild 3, dann erkennt man, dass ein gutes Timing der Feuerwehr ausschlaggebend für den weiteren Verlauf des Einsatzes ist. Wenn die Feuerwehrleute in dem Moment, in dem die gelbe Kurve ihren Höchstwert erreicht hat, eine Türe öffnen, ist das Risiko ungleich höher, als wenn sie das Gleiche beim Spitzenwert der rosa Kurve machen. Indes lässt sich klar erkennen, dass die Temperatur nach dem Übergang zum sauerstoffkontrollierten Feuer in der gelben Graphik schnell abfällt, wohingegen die rosa Graphik ihren Höchstwert erst später erreicht und nur langsam abfällt. Nehmen wir einmal an, dass ein Brand längere Zeit unentdeckt bleibt und Feuerwehrleute erst eine Stunde oder länger nach dem das Feuer den FC/VC Übergangspunkt passiert hat, eine Türe öffnen. In dieser Situation bestünde eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass das Feuer sich durch Sauerstoffmangel bereits selbst gelöscht hätte.

Auf jeden Fall wäre in einer solchen Konstellation die Raumtemperatur nicht mehr sehr hoch und auch die Geschwindigkeit der Luftströmung wäre viel niedriger. Es zeigt sich jedoch, dass unter diesen Bedingungen der Brand, der durch die rosa Kurve dargestellt wird plötzlich gefährlicher ist, als das Feuer der gelben Graphik. Während die rosa Kurve auch längere Zeit nach dem Übergang FC/VC noch auf ihrem Höchstwert liegt, hat die gelbe Kurve zu diesem Zeitpunkt schon ihre gesamte Temperatur eingebüßt.

Um diesen Risiken zu begegnen müssen wir zwei Dinge beachten :

- Wann ist das Feuer in die sauerstoffkontrollierte Phase übergegangen ?
(Wie heiß war es in diesem Moment?)
- Wie heiß ist es noch im Raum, wenn die Feuerwehrleute die Türe öffnen ?

2 Druck

Während eines unterbelüfteten Feuers können merkwürdige Druckverhältnisse in einem geschlossenen Raum entstehen. Ein Feuer bewirkt einen Anstieg der Temperatur, da der Rauch bedeutend heißer ist, als die Umgebungstemperatur. Alle Materialien, die aufgewärmt werden, haben die Neigung sich auszudehnen. Wenn ein Feuer in einem Raum bei geöffneter Türe entsteht, wollen die heißen Rauchgase sich ausdehnen und werden dazu aus dem Raum strömen, dieser Vorgang wird die Temperaturerhöhung größtenteils kompensieren. Da eine breite Öffnung (ungefähr 2 m² im Fall einer Eingangstüre) vorhanden ist, kann das Feuer keinen Druck aufbauen.

Wenn Türen und Fenster geschlossen bleiben, folgt die Brandentwicklung jedoch einem völlig anderen Muster. Der Raum wird sich zunehmend mit heißem Rauch füllen, was einen Anstieg der Temperatur zur Folge hat. Da Temperatur und Druck im Verhältnis zueinander stehen, wird auch der Druck im Raum steigen. So lange das Feuer über genügend Luft verfügt, wird die Hitzeabgaberate (Heat Release Rate) weiter zunehmen und die Raumtemperatur wird dieser Entwicklung zwangsläufig folgen. Das vorhandene Sauerstoffvolumen wird allerdings zur Neige gehen und an einem bestimmten Zeitpunkt wird das Feuer den FC/VC Punkt erreichen, wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben. Nach dem Übergang in die belüftungsabhängige Phase wird sich die Hitzeproduktion verringern, während sich die Energieabgabe über die Wände mehr oder weniger gleichbleibend fortsetzen wird. Nachdem die Temperatur kurzzeitig ihren Höchstwert erreicht hat, wird der ständige Energieverlust über die Wände ein rasches Abfallen der Werte bewirken.

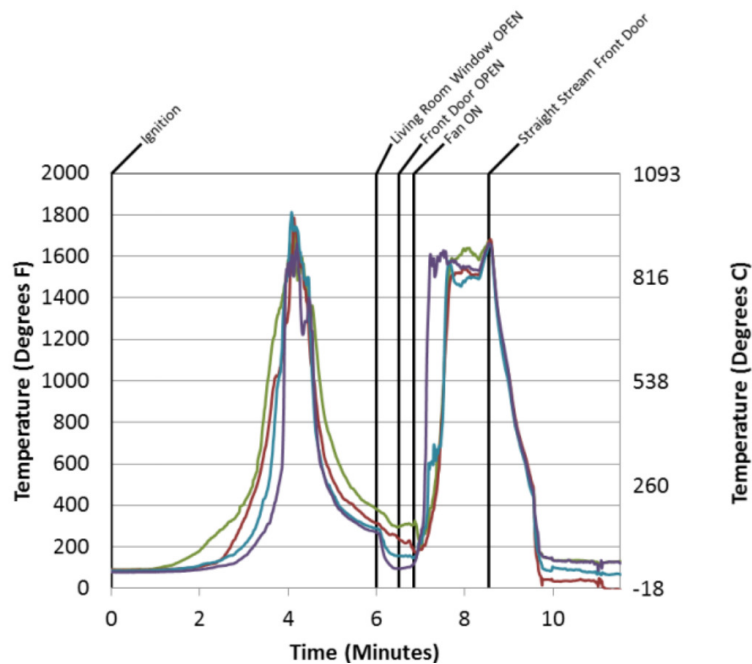


Bild 4 Die Temperaturgraphik von einem der UL Tests. Die gezeigten Temperaturen sind die Werte, die in einem Wohnzimmerbrand gemessen wurden, bei dem sich der Brandherd im gleichen Raum befand. Die verschiedenen Farben bezeichnen verschiedene Messhöhen über dem Boden : Grün: 2,1 m; Rot: 1,5 m; Blau: 0,9 m; Rosa: 0,3 m. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Temperaturkurve erst steil ansteigt und dann wieder abfällt. (© Figure: UL FSRI)

Hiermit ist der Einsatz von Überdruckventilation vor Beginn der eigentlichen Löscharbeiten gemeint.

Bild 4 verdeutlicht graphisch die beschriebene Untersuchung. Das Feuer bewirkt erst einen Anstieg der Temperatur im Inneren des Raumes. Wenn der Sauerstoff zur Neige geht passiert der Brand den FC/VC Punkt und geht in die belüftungskontrollierte Brennphase über. Anschließend ist ein starker Temperaturabfall zu erkennen. Am Anfang sieht man deutlich, dass nach der Entzündung erst eine Entstehungs- und Ausbreitungsphase einsetzt. Nach etwa 1,5 Min. bildet sich eine heiße Rauchdecke : Die grüne Linie gibt die Temperatur wieder, die 2,1 m über dem Boden herrscht. Ungefähr nach 2,5 Min. beginnt die Temperatur auch auf einer Höhe von 1,5 m zu steigen. Das bedeutet, dass die heiße Rauchdecke zu diesem Zeitpunkt bereits bis unterhalb von 1,5 m abgesunken ist. Nur kurze Zeit später schießt die Temperatur schlagartig von um die 200 °C (400 °F) auf 982 °C (1800 °F) hoch, obwohl nur 4 Minuten seit dem Start des Testes vergangen sind. Eine Minute später jedoch fällt der Wert erneut auf 200 °C (400 °F) ab. Die Geschwindigkeit, mit der die Temperatur fällt, wird stark von Menge und Beschaffenheit der Isolation und von den Eigenschaften der verbauten Materialien beeinflusst.

Im Januar 2015 habe ich einer neuen Testreihe des Underwriters Laboratories' Firefighter Safety Research Institute (UL FSRI) in Chicago beigewohnt. UL ist eine amerikanische Prüf- und Zertifizierungsgesellschaft, die schon seit einigen Jahren auf höchstem Niveau Studien und Forschungsarbeit in der Brandbekämpfung betreibt. Jedes Jahr werden dort u.a. in einer großen Versuchshalle zwei baugleiche Häuser gebaut welche anschließend mehrere Male in Brand gesetzt werden. Ziel der Forschung ist die Erprobung neuer Einsatztaktiken in sicheren und erneuerbaren Gegebenheiten.

Vorgabe der Untersuchungen im Januar 2015 war die Beurteilung der Effizienz von Positive Pressure Attack (PPA).

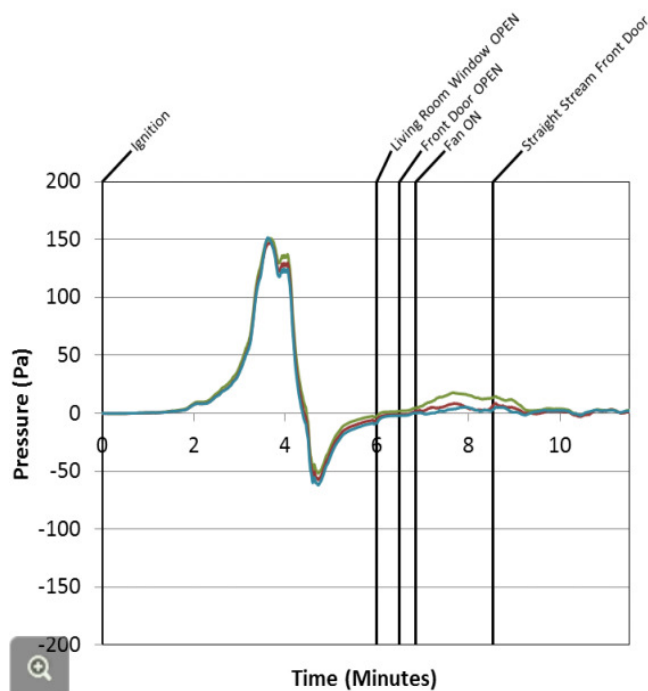


Bild 5 Der Druckunterschied während des Tests. Es ist klar zu erkennen, dass der Druckanstieg mit der Temperaturerhöhung einhergeht. Nach dem Überschreiten der Höchsttemperatur, fällt auch der Druck kontinuierlich ab. (© Figure: UL FSRI)

Bild 5 veranschaulicht die Ausmaße des Druckanstiegs bei der gleichen Branduntersuchung. Während der ersten vier Minuten des Brandes ist der Druck im Raum stark angestiegen. Der Überdruck im geschlossenen Raum erreichte 150 Pa, was gleichbedeutend ist mit einer Kraft von 15 kg/m² Oberfläche. Wenn es in einem solchen Raum eine Tür gibt, mit einer Oberfläche von 2 m², dann üben die heißen Rauchgase in dem Fall eine Kraft von 30 kg auf das Türblatt aus. Es gibt im Ausland dokumentierte Fälle von Bränden in so genannten Passivhäusern, wo die Bewohner es, aufgrund des Überdrucks, nicht mehr schafften eine Türe zu öffnen um zu fliehen. Der Überdruck hat jedoch noch einen anderen Effekt : Er presst die heißen Rauchgase durch kleinste Ritzen und Spalten nach draußen. Dieser Vorgang sorgt dafür, dass Druck, der im Raum aufgebaut wird, begrenzt bleibt.

Sobald das Feuer seine Höchsttemperatur überschritten hat, wird der Rauch nicht mehr weiter mit der gleichen Intensität erhitzt und die Ausdehnung kommt langsam zum Erliegen. Wenn die Temperatur im Raum abfällt, werden auch die Rauchgase abkühlen. Aber solange Überdruck im Raum vorhanden ist, wird dieser weiterhin den Rauch durch die winzigen Öffnungen nach draußen pressen, was wiederum einen allmählichen Druckabfall zur Folge hat, ähnlich wie bei einem Fahrradreifen, der langsam erschlafft.

Gase, die aufgewärmt werden, dehnen sich aus – wohingegen Gase die abkühlen sich zusammenziehen. Wenn sich aufgeheizte Gase nach einem Brand in einem geschlossenen Raum abkühlen und sich demzufolge zusammenziehen, benötigen sie letztendlich weniger Volumen und das Abfallen des Überdrucks wird durch diesen Umstand beschleunigt. Da eine gewisse Menge des Qualmes aus dem Raum gepresst wurde und die zurückgebliebenen, abgekühlten Gase nicht mehr so viel Platz einnehmen wie vorher, füllt der Rauch nicht länger den ganzen Raum. Der Abkühlungsvorgang bewirkt daher eine Umkehrung des Drucks von Überdruck zu Unterdruck. Bei dem oben beschriebenen Experiment in Chicago wurde ein Unterdruck von 50 Pa. gemessen. Es erfolgte anschließend ein Druckausgleich indem durch die gleichen Öffnungen, durch die der Überdruck die heißen Gase nach außen gepresst hatte, frische Luft eingesaugt wurde, bis der Innendruck dem Außendruck (Patm) entsprach.

Wenn man Bild 4 auf Bild 5 projizieren würde, dann würde man sehr gut erkennen, dass beide Phänomene in direkter Relation zueinander stehen. Der Druck stieg, während sich

die Temperatur erhöhte. Auf den Videoaufnahmen des Experimentes erkennt man in dieser Phase, den Rauch, der aus allen Ritzen und Spalten austritt.

Als der FC/VC Punkt überschritten war, begann die Temperatur zu sinken und im gleichen Moment fiel auch der Druck im Raum ab. Im Video kann man beobachten, wie der Rauchaustritt plötzlich stoppt, leider ist das Einströmen der Frischluft mit bloßem Auge nicht sichtbar.

Abschließend ist es wichtig zu beachten, dass die gezeigten Graphiken nur einen einzigen Test wiedergeben. In anderen Tests wurden unterschiedliche Druckverhältnisse festgestellt. Die Entwicklung von Druck und Temperatur ist abhängig von zahlreichen Parametern und kann völlig anders verlaufen, als in den hier beschriebenen Graphiken.

3 Das Eintreffen der Feuerwehr

Die Frage ist jetzt : "Wie können wir das erworbene Wissen im Einsatz anwenden ?"



Bild 6 Rauch strömt aus einem Fenster. Durch Betrachten von Farbe, Strömungsgeschwindigkeit,.. lässt sich schon einiges über den Ernst der Situation in Erfahrung bringen (© Photo: Warre St-Germain)

Bei der Ankunft ein komplett verschlossenes Gebäude vorfinden. Bei geschlossenen Türen und Fenstern ist die Luftzufuhr zu gering um dem Feuer die Entwicklung zum Vollbrand zu ermöglichen. Natürlich muss dies im richtigen Kontext gesehen werden. In einer modernen Wohnung sind die Raumvolumen eher begrenzt und das Feuer wird in der Regel nicht imstande sein ein Fenster zerspringen zu lassen oder eine Öffnung in den Außenwänden herzustellen. Die Feuerwehr kann in diesem Fall davon ausgehen, dass das Ventilationsprofil solange unverändert bleibt, bis die Einsatzkräfte beginnen sich einen Zugang zu verschaffen. Diese Vorgabe ist jedoch situationsbedingt. In einer Fabrikhalle, zum Beispiel, ist es sehr wohl möglich, dass ein Brand sich, aufgrund des riesigen Raumvolumens und der enormen Menge vorhandenen Sauerstoffs, zum Vollbrand entwickelt, bevor er in den belüftungskontrollierten Verbrennungsablauf wechselt. Darüber hinaus ist es jederzeit möglich, dass ein Plastikelement in einer Wand (z.B. ein Tor) oder im Dach (z.B. eine transparente Kunststoffwellplatte) schmelzen könnte und dadurch eine Öffnung geschaffen wird, durch die Belüftung entsteht.

Beim Eintreffen am Einsatzort sollte jeder versuchen, sich ein Bild von den Vorgängen im Inneren des brennenden Gebäudes zu machen. Vor allem (Unter-) Offiziere müssen in der Lage sein, die Situation zu erfassen und richtig einzuschätzen. Aus einer genauen Betrachtung der Belüftungsöffnungen, deren Größe und Lage lassen sich bereits erste Schlussfolgerungen auf das Brandverhalten ableiten, so zum Beispiel ob man es mit einem belüfteten oder unterbelüfteten Feuer zu tun hat. Sollte es eine geöffnete Türe geben, aus der Rauch austritt, dann kann man mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass es sich um ein ausreichend belüftetes Feuer handelt.

Eine völlig andere Situation präsentiert sich den Feuerwehrleuten, wenn sie bei

Falls diese Situation eintritt, lässt sich immerhin, unter Berücksichtigung der Größe des Gebäudes, durch genaue Observation der Öffnungen in den Wänden oder im Dach einschätzen, ob es sich um ein belüftetes oder unterbelüftetes Feuer handelt.

3.1 Unterbelüftete Feuer kurz nach dem FC/VC Punkt

Wenn es keine Öffnungen im Gebäude gibt, muss das Verhalten des austretenden Rauchs aufmerksam betrachtet werden. Im vorherigen Kapitel wurde erklärt, dass ein Feuer in der Ausdehnungsphase in einem geschlossenen Raum Druck aufbaut. Der Überdruck führt dazu, dass der Rauch durch Spalten, Ritzen und andere Öffnungen nach draußen gepresst wird. Umso höher der Druck im Inneren des Raumes steigt, umso mehr Rauch wird mit immer größerer Strömungsgeschwindigkeit aus dem Gebäude entweichen.



Bild 6 Während dieses unterbelüfteten Feuers ist die Temperatur im Gebäudeinneren enorm angestiegen. Der aufgebaute Überdruck presst die Rauchgase nach draußen (© Photo: Zbigniew Wozniak)

Wenn Rauch aus einem Gebäude gepresst wird, dann ist dies immer ein Indiz für großen Druck im Inneren der Räumlichkeiten. In der Konsequenz bedeutet dies, dass eine sehr hohe Temperatur vorhanden sein muss, um einen solchen Überdruck zu erzeugen. Wenn in dieser kritischen Phase eine Türe geöffnet wird, setzt eine heftige Luftströmung ein. Große Rauchvolumen werden mit brutaler Kraft durch die Öffnung nach draußen gepresst und gleichzeitig wird Frischluft eingesaugt. Es entsteht in diesem Moment der typische Lufttunnel. Der größte Teil der Türöffnung

wird genutzt um den Rauch abzuführen, während im unteren Teil ein Tunnel aus Frischluft gebildet wird. Diese Situation wird nicht lange anhalten, da, aufgrund der großflächigen Öffnung, der Überdruck schnell abfallen wird. Es wird weiterhin eine Luftströmung in den Raum hinein und einen Rauchausstoß aus dem Raum hinaus geben. Aber auch dieser Zustand wird sich schnell weiterentwickeln. Ein durch die Belüftung ausgelöster Flashover wird sehr wahrscheinlich zeitnah folgen. In seltenen Fällen kann es sogar zu einem Backdraft-Phänomen kommen.

Die hierdrüber beschriebene Situation ist in einem Einsatz klar erkennbar. Wenn den Feuerwehrleuten ein gewisses Maß an Kenntnissen über den Brandverlauf bei unterbelüfteten Feuern vermittelt wurde und sie mit dem Einfluss von Temperatur und Druck vertraut sind, können sie die Abläufe erkennen und verstehen was vor sich geht. Die Vorgänge, die beim Öffnen einer Türe einsetzen, können erneut anhand der Analogie zu einer Autobahnbaustelle versinnbildlicht werden. Vor der Baustelle mussten die Fahrer auf 70 km/h abbremsen. Allerdings haben es die meisten Autofahrer sehr eilig und wollen so schnell wie möglich wieder auf 120 km/h beschleunigen.

Sobald sie den Baustellenbereich hinter sich gelassen haben, erscheint ein Schild, welches ihnen mitteilt, dass die Geschwindigkeitsbegrenzung nicht mehr länger gilt. Alle Fahrer werden unmittelbar nach dem Schild ihr Fahrzeug wieder auf 120 km/h beschleunigen.

Ein Feuer, wie das vorherig beschriebene, wird sich schnell zurück zu voller Stärke entwickeln, wenn ihm die benötigte Frischluft zugeführt wird. Der Brand wird bis auf das maximal mögliche Leistungsvermögen „beschleunigen“, welches er mittels des durch die Türöffnung angelieferten Luftvolumens erreichen kann.

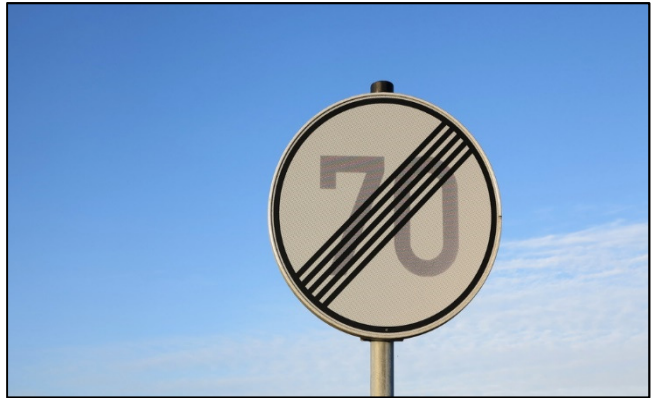


Bild 7 Am Ende der Baustelle wird die Geschwindigkeitsbegrenzung aufgehoben. Ein Feuer hat nur eine begrenzte HRR, bedingt durch Luftmangel. Sobald eine Türe geöffnet wird, wird auch hier die Einschränkung aufgehoben und der Brand wird sich zu einem durch Belüftung hervorgerufenen Flashover entwickeln. (Photo: shutterstock)

3.2 Unterbelüftete Feuer in Unterdruckatmosphäre

In Kapitel 1, Absatz 2 wird davon gesprochen, dass unterbelüftete Feuer sich durch Sauerstoffverbrauch und demzufolge durch Sauerstoffmangel praktisch selbst zum Erlöschen bringen können. Man spricht dann von einem Brand, der sich selbst erstickt hat. In diesem Fall werden sowohl der Druck, wie auch die Temperatur im Raum abfallen. Der Rauchgasausstoß nach draußen kommt zum Erliegen aber in den meisten Fällen hat der Rauch Spuren hinterlassen. Rückstände von Ruß an Fenstern und Türen sind oftmals die einzigen Zeichen, die darauf hinweisen, dass im Raum ein Brandereignis stattgefunden hat oder noch stattfindet. Es ist von außerhalb meistens nicht klar zu erkennen, ob sich ein Feuer in seiner Unterdruckphase befindet oder ob es vollständig erloschen ist.

Wenn Einsatzkräfte in der Nacht zu einem solchen Einsatz beordert werden, dann kann es leicht passieren, dass diese wichtigen Zeichen schlichtweg übersehen werden. Letzten Endes ist es tatsächlich so, dass nicht das geringste Anzeichen einer Rauchentwicklung zu sehen ist. Es ist daher extrem wichtig, niemals irgendwelche Schlussfolgerungen aus der Tatsache abzuleiten, dass keine Anzeichen sichtbar sind! Der amerikanische Feuerwehrmann Ed Hartin prägte dazu folgenden Satz : „Nichts zu sehen bedeutet genau das : Nämlich nichts!“ In den meisten Fällen, in denen Feuerwehrleute beim Eintreffen vor Ort keine Anzeichen für ein Feuer feststellen können, bestätigt sich anschließend diese erste Einschätzung der Lage. Allerdings stellt sich dadurch auch oftmals eine gewisse Routine und Nachlässigkeit ein, die mitunter gefährlich werden kann. Denn erst wenn die Türe zu einem verdächtigen Raum geöffnet wird, stellt sich heraus, ob in diesem Raum etwas vor sich geht, oder nicht.

Wenn eine Tür zu einem Raum geöffnet wird, in dem sich ein Feuer in seiner Unterdruckphase befindet, wird dies eine starke und turbulente Luftströmung in den Raum hinein auslösen, ohne dass dabei gleichzeitig Rauchgase austreten. Die Luftströmung in das Rauminnere kann so stark sein, dass es unmöglich ist, eine sich nach innen öffnende Türe noch einmal zu schließen.

Eine solch starke Strömung ist ein sicherer Hinweis darauf, dass im Rauminnen ein sehr intensives und heftiges Feuer gebrannt hat. Bild 4 und 5 zeigen eine Innentemperatur von rund 200 °C wobei der Unterdruck zu diesem Zeitpunkt bei 50 Pa. liegt. Gesetzt den Fall, dass Feuerwehrleute unter diesen Bedingungen eine Türe öffnen, wird einige Zeit später (zwischen 2 und 4 Minuten) ein durch die Luftzufuhr ausgelöster Flashover entstehen.

Auch dies ist kein unbekanntes Szenario für die Feuerwehr und kann auf einfache Weise erkannt werden, Voraussetzung ist ein gewisses Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Brandverlauf, Belüftungsöffnungen, Temperatur und Druck. Es ist eminent wichtig, dass Befehlshaber und Einsatzleiter diese Signale erkennen und einordnen können. Auf diese Weise können sie ihre Taktik, wenn nötig, der Situation anpassen und den Einsatz zu einem guten und sicheren Ende führen.

3.3 Unterbelüftete Feuer, lange nachdem der FC/VC Punkt überschritten wurde

Es gibt noch eine dritte mögliche Konstellation, nämlich die Möglichkeit, dass der Brand schon seit einer geraumen Zeit selbst erloschen ist. Auf Bild 3 sind drei unterschiedlich verlaufende unterbelüftete Brände zu sehen. Die gelbe Linie stellt ein Feuer dar, wie es in Bild 4 wiedergegeben wird. Die Temperatur steigt sehr stark an, bevor der Mangel an Sauerstoff Wirkung zeigt. Man erkennt deutlich, dass die Temperatur anschließend schnell wieder abnimmt. In modernen Gebäuden ist es wenig wahrscheinlich, dass die Hitze eines Feuers ein Fenster zum Platzen bringt, im Umkehrschluss bedeutet dies, dass das Volumen in dem das Brandereignis stattfindet mehr oder weniger geschlossen bleibt. Nach Ablauf einer gewissen Zeit wird der Brand durch Sauerstoffmangel von alleine ausgehen. Die heißen Rauchgase und die aufgeheizte Luft werden ihre Energie an die Wände abgeben und einige Zeit später wird sich die Temperatur dem Wert annähern, der vor dem Brandereignis im Raum herrschte.

Sollten Feuerwehrleute in diesem Moment eine Türe öffnen, wird ein kaum spürbarer Luftstrom einsetzen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass weder ein Druckunterschied mit dem Außendruck zu verzeichnen ist, noch liegt die Temperatur im Raum wesentlich höher als die Umgebungstemperatur. Wenn überhaupt eine Luftströmung entsteht, wird diese nur sehr langsam in Gang kommen. Auch diese Anzeichen sind für Feuerwehrleute, beispielsweise mithilfe einer Wärmebildkamera, leicht und deutlich zu erkennen. Das Gerät wird klar sichtbar bestätigen, dass kein nennenswerter Temperaturanstieg im Raum zu erkennen ist. Die Wärmebildkamera ist ein wertvolles Instrument zum Schutz der Feuerwehrleute beim Vorrücken in einen unterbelüfteten Brand, denn sollte das Feuer tatsächlich komplett erloschen sein, wird die Raumtemperatur unverändert bleiben. Sollte jedoch noch ein Brandherd vorhanden sein und das Feuer durch Luftzufuhr wieder an Stärke gewinnen, wird die Wärmebildkamera den Temperaturanstieg im Raum bemerken, noch bevor die anwesenden Feuerwehrleute die Veränderung durch ihre Schutzkleidung hindurch wahrnehmen können.

4 Quellennachweis

- [1] *Study of the Effectiveness of Fire Service Positive Pressure Ventilation During Fire Attack in Single Family Homes Incorporating Modern Construction Practices, UL FSRI, resultaten verwacht in 2016*
- [2] *Impact of ventilation on fire behavior in legacy and contemporary residential Construction, Kerber Steve, 2011*
- [3] *Ventilating today's residential fires, Kerber Stephen, presentatie op FDIC, 2011*
- [4] *Fire dynamics: Technical approach, tactical application, Lambert Karel & Baaij Siemco, 2015*
- [5] *Scientific research for the development of more effective tactics, UL FSRI, Fire Department New York & NIST, 2012*