

Wie sterben Menschen bei Bränden ?

1 Einleitung

Jeder Feuerwehrmann weiß, dass Feuer eine lebensfeindliche Umgebung ist und dass Menschen im Feuer nach kurzer Zeit sterben. Dennoch mangelt es oft an genauem Wissen über die eigentlichen Vorgänge, die bei einem Brand den Tod von Menschen hervorrufen. Ein Feuer produziert Rauch und Hitze. Beides sind potenzielle Todesursachen für Opfer, die in ein Feuer geraten. Im folgenden Artikel werden diese beiden todbringenden Erscheinungen genauer betrachtet. Auch der Einfluss, den die daraus resultierende Erkenntnis, auf die operationelle Vorgehensweise der Feuerwehr hat, wird mit in die weiteren Überlegungen einbezogen. Beeinflusst beispielsweise das veränderte Brandverhalten diese Erscheinungen? Und wenn dem so ist, warum haben diese Veränderungen Auswirkungen auf die Rauch- und Hitzeentwicklung? Und um welche Auswirkungen handelt es sich?

2 Hitze

Ein Feuer produziert Energie. Diese Energie wird genutzt, um die Umgebung zu erhitzen. Dabei ist das Leistungsvermögen des Brandes oder die Wärmefreisetzungsrate (Heat Release Rate, HRR) von entscheidender Bedeutung. Die Einheit der Wärmefreisetzungsrate wird üblicherweise in Energie pro Zeit ausgedrückt. Die HRR gibt also wieder, wieviel Energie (in J gemessen), während einer Sekunde von einem Feuer produziert wird (1 Joule/Sekunde = 1 Watt). Da bei einem Brand meist große Mengen Energie freigesetzt werden, wird die HRR in der Regel in kW oder MW wiedergegeben.

Die abgegebene Hitze eines Feuers wird hauptsächlich durch Konvektion oder Strahlung übertragen. Eine annehmbare Schätzung besagt, dass etwa 70 % der freigesetzten Hitze über Konvektion transportiert wird, während die restlichen 30 % durch Strahlung abgeleitet werden.

2.1 Wärmeübertragung durch Konvektion (Strömung)

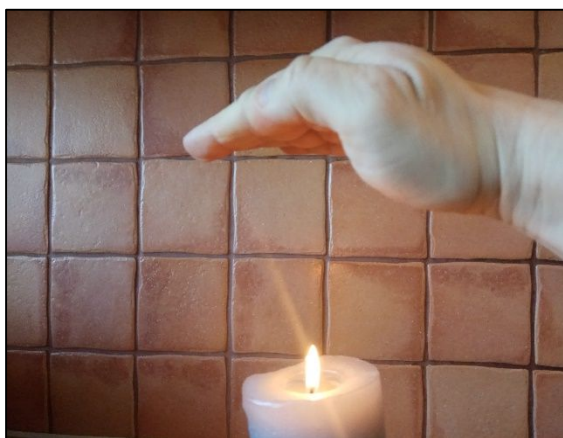


Bild 1 Über der Flamme lässt sich der Konvektionsanteil der produzierten Hitze sehr gut spüren. (Foto: Szymon Kokot-Góra)

Diese Art der Wärmeübertragung ist verantwortlich für den bedeutendsten Teil des Energietransportes während eines Brandes. Der Wärmestrom kann sehr einfach am Beispiel einer Kerze demonstriert werden. Hält man die Hand etwa 10 cm über der Flamme, fühlt sich die Hitze an, wie aufsteigende, heiße Luft (Rauch). Hält man die Hand im gleichen Abstand zur Seite der Kerze, fühlt man sofort den Unterschied zwischen Konvektion und Strahlung. Man spürt sehr viel weniger Hitze. Der Hitzestrom wird von den Rauchpartikeln transportiert. Umso höher die HRR eines Feuers ist, desto heißer wird daher der Rauch werden.

Es besteht allerdings noch ein weiterer Faktor, der direkten Einfluss auf die Temperatur der Rauchgase hat. Es ist die Höhe der Rauchschiicht im Verhältnis zur Raumhöhe, die hier eine bedeutende Rolle spielt. Bei einem Feuer, das sich in einem Hausbrand auf dem Boden eines normal hohen Zimmers ausbreitet, muss der Rauch anfänglich etwa 2,6 Meter bis zur Zimmerdecke zurücklegen. Während des Aufstiegs wird sich Luft mit den Rauchgasen vermischen (sh. Bild 2). Volumen und Masse des Rauchs werden also, auf dem Weg zur Zimmerdecke, kontinuierlich ansteigen. Die Menge der kühleren Luft, die sich auf ihrem Weg nach oben mit den Rauchgasen vermischt, bestimmt die Endtemperatur des Gemisches. In einem 5 Meter hohen Ausstellungsraum wird daher der Rauch unter der Decke bedeutend kühler sein, als in einer 2,6 Meter hohen Wohnungsküche. Im weiteren Verlauf des Feuers wird sich unter der Decke eine Rauchschiicht bilden. Wenn man davon ausgeht, dass die Rauchschiicht in einem normalen Wohnungsbrand zu diesem Zeitpunkt etwa einen Meter Durchmesser beträgt, dann muss der Rauch, vom Boden aus kommend, nur noch anderthalb Meter zurücklegen, um die Rauchschiicht zu erreichen. Das bedeutet, dass sich weniger kühle Luft mit den Rauchgasen vermischen kann und dass die Rauchgase bedeutend heißer sind, wenn das Gemisch oben ankommt. Hinzu kommt, dass der Brand in den meisten Fällen, zu diesem Zeitpunkt seine Wärmeabgaberate bereits gesteigert hat. Es wird also mehr Hitze zugeführt als am Anfang, während weniger kühle Luft beigemischt wird. Das führt zu weitaus heißerem Rauch, als in der Anfangsphase.

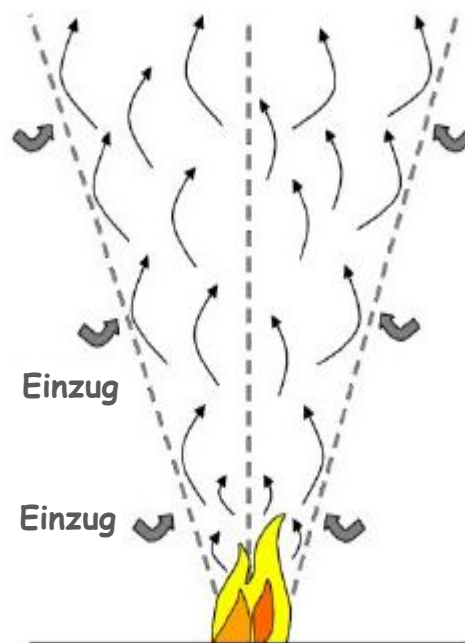


Bild 2 Während der Rauch aufsteigt, wird mehr und mehr Luft beigemischt. Dieser Vorgang wird als "Einzug" bezeichnet. (Bild: Edward Johnson)

Die heiße Rauchschiicht wird jetzt zu einer Hitzequelle, die begonnen hat, ihre Energie auf andere Objekte zu übertragen. Die Rauchgase wollen sich ausbreiten, werden aber durch Zimmerdecke und Wände eingeschränkt. Die Temperatur des Rauchs ist anfänglich bedeutend höher, als die der Wände und der Decke. Es wird daher eine Wärmeübertragung (durch Konvektion) auf die Wände und die Zimmerdecke entstehen. Dabei wird ein kleiner Teil des Rauchs abkühlen, während Wände und Plafond sich immer weiter erhitzen. Wenn dieser Vorgang sich fortsetzt, werden Decke und Wände sehr bald kaum noch Hitze aus der Rauchschiicht absorbieren. Die Wärmeübertragung verhält sich nämlich proportional zum Temperaturunterschied (ΔT). Daraus ergibt sich der Grundsatz: Desto geringer der Temperaturunterschied ist, desto weniger Wärmeübertragung findet statt. Zu erwähnen wäre noch, dass die Wände und die Zimmerdecke ihrerseits einen Teil der Hitze durch Strahlung und Konduktion (Wärmeleitung) nach draußen abgeben.

Es ist möglich die Wärmeübertragung durch Konvektion zu berechnen:

$$\dot{Q} = h \times A \times \Delta T \quad [kW]$$

Wenn Rauch, der durch ein Gebäude fließt, auf eine Öffnung trifft, dann wird der Rauch aus dem Gebäude strömen. Entweichender Rauch bedeutet, dass ein gewisses Volumen, eine gewisse Masse an Rauch, kontinuierlich das Gebäude verlässt. Dieser Vorgang ist gleichbedeutend mit einer gewissen Energiemenge, die fortlaufend aus dem Gebäude entweicht.

Wenn die Rauchsicht bis auf etwa einen halben Meter über den Boden abgesunken ist, dann befinden sich Feuerwehrleute, die einen Innenangriff durchführen teilweise in den Rauchgasen. Der Teil des Körpers, der mit den heißen Gasen in Kontakt kommt, wird die Hitze absorbieren. Tatsächlich verhält sich die Körperoberfläche (A), die dem Rauch ausgesetzt ist, ähnlich wie die Mauern des Gebäudes, welche die Rauchausbreitung eingrenzen. Die Rauchsicht wird Hitze auf die Brandkleidung der Feuerwehrleute übertragen. Auch hier gilt: Die Energiemenge, die übertragen wird, ist abhängig vom Temperaturunterschied zwischen Kleidung und Rauch. Anschließend wird durch Konduktion (Wärmeleitung) die Hitze aus der Kleidung auf die Haut der Feuerwehrleute abgeleitet.

Wenn die Rauchsicht bis zum Boden abfällt, werden augenblicklich alle sich dort befindlichen Opfer die Effekte der Wärmeübertragung spüren. Die Kleidung, die sie tragen, spendet hier nur wenig, bis gar keinen Schutz. Das gilt auch für Opfer, die an einem geöffneten Fenster, im Strömungspfad der entweichenden Rauchgase stehen. Auch sie sind der Hitze aus den Rauchgasen ausgesetzt. In diesem Fall verschärft noch ein weiteres Problem die Situation, denn die Wärmeübertragung durch Konvektion steht in direkter Relation zur Geschwindigkeit mit der die Gase ausströmen. Die Strömungsgeschwindigkeit der Gase ist jedoch nur ein Faktor zur Festlegung des Wärmeübertragungskoeffizienten h . Dieser Koeffizient wird durch eine ganze Reihe von Faktoren beeinflusst, von denen einer die Schnelligkeit der Rauchströmung ist. Einfach gesagt bedeutet dies: Umso schneller der Rauch strömt, umso mehr Hitze wird übertragen.

Darüber hinaus wird ebenfalls eine große Menge Hitze durch Strahlung übertragen. Auf ihrem Weg nach draußen wird die Rauchsicht alle Gegenstände, die sich unter ihr befinden anstrahlen.

2.2 Strahlung

Strahlung ist eine Form von Wärmeübertragung, die Jedem vertraut ist. Das bekannteste Beispiel für Wärmestrahlung sind die Sonnenstrahlen an einem warmen Sommertag. Jeder kann den Effekt der Wärmestrahlung fühlen. An einem Lagerfeuer oder einer anderen Feuerstelle wird außerdem ersichtlich, dass die Strahlungswärme sich erhöht, wenn sich der Abstand zur Hitzequelle verringert.

In einem Brand ist der Brandherd die primäre Quelle der Strahlungshitze. Der Brandherd und die Flammen darüber, werden Hitze abstrahlen. Strahlungshitze bewegt sich in geraden Linien fort. Alle Gegenstände, die sich in der *optischen Achse* zum Feuer (und den Flammen) befinden, werden angestrahlt und dadurch aufgeheizt.



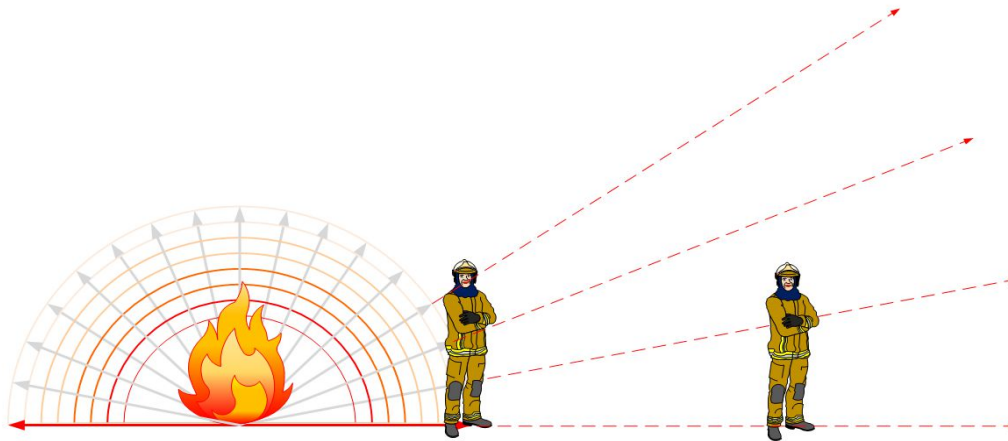


Bild 3 Beide dargestellten Feuerwehrleute sind gleich groß, auch wenn dies auf dem Bild nicht den Anschein hat. Der Feuerwehrmann, der sich näher an den Flammen befindet, muss eine viel höhere Strahlungswärme verkraften, als sein Kollege, der sich weiter entfernt aufhält. Das lässt sich leicht an der Anzahl Pfeile erkennen, von denen er getroffen wird. Desto weiter man sich von der Wärmequelle entfernt, desto weniger Strahlungswärme (Pfeile) wird aufgenommen.
(Zeichnung: Bart Noyens nach einer Idee von James Mendoza vom San Jose Fire Department)

Auch die heiße Rauchschiicht wird Objekte anstrahlen, die sich in ihrer direkten „optischen Achse“ befinden. Dabei handelt es sich um die Gegenstände, die sich unterhalb der Rauchdecke befinden. Das bedeutet, dass in der nahen Umgebung eines Brandherdes ein Möbelstück von zwei Wärmequellen gleichzeitig erhitzt wird. Das kann von großer Wichtigkeit sein, denn es überwindet Entfernungen. Warum ist das so?

Wie bereits erwähnt, gibt der Brandherd Strahlungshitze ab. In der Regel ist diese Strahlung sehr intensiv, allerdings kann der Abstand zu einem Möbelstück fünf Meter oder mehr betragen, was die Intensität der Strahlung stark verringert. Die Rauchschiicht über dem Möbelstück hingegen, ist zwar weniger heiß als der Brandherd oder die Flammen über dem Brandherd, trotzdem kann die Wärmeübertragung aus der Rauchschiicht auf das Möbelstück weitaus intensiver sein. Das liegt an der geringeren Distanz. So kann sich beispielsweise eine Rauchdecke einem Möbelstück bis auf einen halben Meter weit nähern, während der Brandherd meist lokal begrenzt ist und sich nur langsam ausbreitet. Die Strahlung aus der Rauchschiicht sorgt also für die thermische Aufbereitung von weiter entfernten Gegenständen. Der Brandherd kann sich auf diese Weise schneller ausdehnen.

Die Entfernung zwischen der Wärmequelle und dem angestrahlten Objekt ist ein wichtiger Parameter zur Ermittlung der Wärmeübertragung durch Strahlungshitze. Strahlungshitze (ausgedrückt in kW/m^2) verhält sich umgekehrt proportional zum Abstand im Quadrat. Das heißt, dass die Strahlung mit dem Abstand zur Strahlungsquelle im Quadrat abnimmt. Die übertragene Strahlungshitze verringert sich also um das Vierfache, wenn der Abstand zur Wärmequelle verdoppelt wird. Der Wert, der den Bruchteil der aufgenommenen Hitzestrahlung im Verhältnis zur abgegebenen Hitzestrahlung angibt, wird als *Sichtfaktor* bezeichnet. Das Symbol, mit dem der Sichtfaktor dargestellt wird, ist ϕ . In Bild 3 wird deutlich, dass der Feuerwehrmann, der sich näher zur Wärmequelle aufhält, eine größere Menge Strahlungshitze aufnimmt, als sein Kollege, der sich weiter entfernt befindet.

Ein zweiter wichtiger Parameter ist die Temperatur der Hitzequelle. Es wurde bereits gesagt, dass, bei der Wärmeübertragung durch Konvektion, die Menge der übertragenen Energie durch den Temperaturunterschied zwischen der Wärmequelle und dem Empfänger festgelegt wird.

Bei der Wärmeübertragung durch Strahlung gestalten sich diese Dinge jedoch etwas komplizierter. Die Wärmequelle strahlt Hitze aus. Die Menge der ausgestrahlten Hitze ist direkt proportional zur Temperatur und erhöht sich in der Temperaturskala nach Kelvin in der 4ten Potenz, also K^4 . Das ist etwas schwerer zu verstehen. Einfach ausgedrückt bedeutet es jedoch, dass die Menge der Strahlungshitze sich um das 16fache erhöht, wenn der Temperaturwert in Kelvin sich verdoppelt. Die Temperatur in Kelvin liegt um 273 höher, als der Wert in Grad Celsius. Eine Temperatur von 400 Kelvin ist daher gleichbedeutend mit 127 °C. Ein Temperaturwert von 800 Kelvin ergibt 527 °C. Wenn die Temperatur der Rauchschiicht sich von 127 °C auf 527 °C erhöht hat, dann wird sich gleichzeitig die Strahlungshitze, die von der Rauchschiicht ausgeht, um den Faktor 16 erhöht haben.

Wenn Objekte mit verschiedenen Temperaturen anwesend sind, dann wird jedes dieser Objekte Hitze abgeben. Das Möbelstück, welches durch den Brand und die Rauchschiicht aufgeheizt wird, gibt selber auch Hitze ab. Wenn also beispielsweise ein Sofa, die Temperatur von 77 °C (350 K) erreicht hat, wird es beginnen Hitze abzugeben. Es ist allerdings naheliegend, dass die abgegebene Strahlungshitze des Sofas vernachlässigbar ist, verglichen mit der Energiemenge, die aus der Rauchschiicht kommt.

Es ist möglich die Wärmeübertragung durch Strahlung zu berechnen:

$$\dot{Q} = \sigma \times \epsilon \times \Phi \times T^4 \quad [kW/m^2]$$

Die Strahlungshitze kann auch gefährliche Auswirkungen auf eventuelle Opfer haben. Personen, die am Boden liegen oder auf einem Balkon stehen, können sowohl aus den Flammen, wie auch aus der Rauchschiicht angestrahlt werden. Bei Wohnungsbränden flüchten Menschen sich oft auf den Balkon. Dort sind sie zwar nicht länger dem Rauch ausgesetzt aber die Strahlungshitze kann immer noch zu schweren Verbrennungen führen. Ein Mensch, der auf einem Balkon neben einer großen gläsernen Schiebetüre steht, aus der Flammen schlagen, wird Verbrennungen erleiden. Diese Feststellung ist ein überzeugendes Argument für den Einsatz der ‚transitional attack‘. Indem die Flammen niedergeschlagen werden, sinkt die Temperatur der austretenden Gase deutlich. Die Strahlungshitze wird schnell um das 16fache verringert. Das bedeutet für das Opfer, dass es sich während einer 16 Mal längeren Zeitperiode auf dem Balkon aufhalten kann, bevor es die gleiche Menge Strahlungshitze aufnimmt. Es ist bei dieser Taktik allerdings sehr wichtig, die richtige Wassermenge einzusetzen. Die ersten Dutzend Liter, die man in den brennenden Raum einbringt, werden verdampfen und dabei dem Feuer eine enorme Menge Energie entziehen. Die Flammen sind genau betrachtet, super-heiße Gase. Wenn diesen Flammen die Energie entzogen wird, ziehen sich die Gase zusammen. Dadurch entsteht freies Volumen, welches augenblicklich durch den sich ausdehnenden Wasserdampf eingenommen wird. Wenn danach weiterhin Wassermengen in den Raum eingebracht werden, wird dieses Wasser hauptsächlich an der Zimmerdecke und auf den heißen Wänden verdampfen. Wände und Decke können jedoch ihren Zustand nicht verändern und es entsteht daher kein freies Volumen.



Der überschüssige Wasserdampf wird sich in alle Richtungen ausbreiten und stellt eine ernstzunehmende Gefahr für Feuerwehrleute und Opfer dar. Es ist daher enorm wichtig, dass, sobald der ‚knockdown‘ des Feuers erreicht wurde, das Strahlrohr sofort geschlossen wird.

3 Rauch

Die Produktion von Rauch hängt stark von der Art des Feuers ab. Wenn man Feuer aus dem Blickpunkt der Rauchproduktion betrachtet, dann gibt es drei Arten von Bränden: den Schwelbrand, den belüfteten Brand und den unterbelüfteten Brand. Ein Schwelbrand wird als langsamer Verbrennungsprozess, mit niedrigen Temperaturen und ohne Lichterscheinung (Flammen), definiert. Schwelbrände und unterbelüftete Brände produzieren für gewöhnlich große Mengen Rauchgase (etwa die zehnfache Menge eines belüfteten Brandes). Die Rauchproduktion bei Schwelbränden ist stark abhängig von der Größe (Oberfläche) und der Art (Geschwindigkeit) mit der sich der Brand ausbreiten kann. Eine Zigarette, beispielsweise, die irgendwohin fällt, kann dort einen Schwelbrand verursachen aber dieses Feuer wird nicht unbedingt in der Lage sein, sich auf weitere Gegenstände auszudehnen. Wenn die Oberfläche des Schwelbrandes somit klein bleibt, dann setzt auch nur eine geringe Raucherzeugung ein.

Rauch ist ein Gemisch aus Gasen, festen Partikeln (Ruß) und schwebenden Flüssigpartikeln. Auch andere Gase werden in großen oder kleineren Mengen produziert. CO₂ and CO sind neben den Pyrolysegasen zwei bedeutende Bestandteile der Rauchgase. Wenn im Brennstoff auch Stickstoff enthalten ist, bilden sich während der Verbrennung zusätzlich Substanzen wie HCN (Blausäure). Schließlich enthält der Rauch oftmals noch einen gewissen Anteil Sauerstoff. Dieser liegt jedoch weit unterhalb der, gewöhnlich in der Luft enthaltenen, Menge von 21%. Der Rauch wird in Schwaden bis unter die Zimmerdecke aufsteigen und dort eine Rauchsicht bilden. Die Zusammensetzung der Rauchsicht ist nicht beständig und verändert sich fortwährend. Im Innern der Rauchsicht kommt es in Teilen, in denen Temperatur und Sauerstoff gleichermaßen ausreichend vorhanden sind, zu spontanen und lokal begrenzten Verbrennungen. Bei brennstoffkontrollierten Bränden ist der CO-Anteil in der Rauchsicht direkt proportional zur Temperatur des Feuers, während sich der CO-Anteil in der Rauchsicht eines sauerstoffkontrollierten Feuers umgekehrt proportional zur Temperatur des Feuers verhält. Der Anteil der verschiedenen Gase in der Rauchsicht verändert sich während der Verbrennung ständig. Hierbei handelt es sich um einen enorm komplexen Vorgang.

4 Effekte auf den menschlichen Körper

4.1 Hitzeeffekte

Wenn sich die Haut erwärmt, macht sich das zuerst in einer angenehmen Wahrnehmung bemerkbar. Die Sonnenstrahlen auf der Haut sind dafür erneut das beste Beispiel. Aber jeder, der bereits einen Sonnenbrand erlitten hat, der weiß, dass diese angenehme Wahrnehmung auch sehr schnell zu einer schmerzhaften Erfahrung werden kann. Die meisten Menschen hatten schon einmal Verbrennungen ersten Grades, weil sie zu lange der Sonnenstrahlung ausgesetzt waren. Die Strahlungswärme der Sonne an einem schönen Sommertag beträgt ungefähr 1 kW/m².



Aber bereits ein zu langes Sonnenbad auf diesem geringen Strahlungslevel kann zu ernsthaften Verbrennungen ersten Grades führen.

Der Temperatur der Haut kann natürlich immer weiter erhitzt werden. Beispielsweise durch Wärmeübertragung oder Strahlungshitze, so wie obenstehend beschrieben. Die menschliche Schmerzgrenze liegt bei 43 °C.

Wenn die Haut weiter erhitzt wird, stellt sich ein Schmerzgefühl ein, das als Warnung dient, um den Körper vor ernsthaften Verletzungen zu schützen. Desto höher die Temperatur ansteigt und desto mehr Oberfläche betroffen ist, desto größer werden die Schmerzen. Diese Schmerzen können so unerträglich werden, dass sie Menschen dazu bringen sich aus einem Fenster in den sicheren Tod zu stürzen.

Verbrennungen ersten Grades mit der typischen Rötung der Haut, entstehen, wenn die Temperatur der Haut auf 48 °C ansteigt. Bei einer Temperatur von 55 °C, kommt es bereits zu Verbrennungen zweiten Grades, mit, als charakteristischem Merkmal, der Bildung von Brandblasen. Bei noch höheren Temperaturen treten Verbrennungen dritten Grades auf, was gleichbedeutend ist, mit der totalen und irreparablen Zerstörung der Haut an den betroffenen Stellen.

Da ein natürlicher Unterschied besteht zwischen der Temperatur der Haut eines Menschen und der Temperatur der Rauchsicht eines Brandes, wird eine Wärmeübertragung einsetzen. Diese kann durch Konvektion und/oder durch Strahlung stattfinden. In jedem Fall wird die Haut des Opfers sehr stark erhitzt werden.

Feuerwehrleute, sind oft beiden Phänomenen ausgesetzt, sowohl der Wärmeübertragung durch Konvektion, wie auch durch Strahlung. Sie arbeiten nicht selten in Rauchsichten, die bereits eine gewisse Temperatur aufweisen und sind gleichzeitig einer erheblichen Hitzestrahlung (in kW/m²) ausgesetzt. Die US-Organisation NIST hat eine Graphik angefertigt, die den Effekten beider Formen der Hitzeübertragung Rechnung trägt. In der Graphik wird auch die schützende Wirkung der Einsatzkleidung berücksichtigt.

Die graphische Darstellung des Problems durch das NIST ist natürlich nur eine stark vereinfachte Version der Wirklichkeit. Trotzdem kann sie als eine gute Basisschätzung zur Berechnung der Zeit dienen, während der sich Feuerwehrleute in gewissen Bedingungen aufhalten können, bevor sie ernsthafte Verbrennungen erleiden.

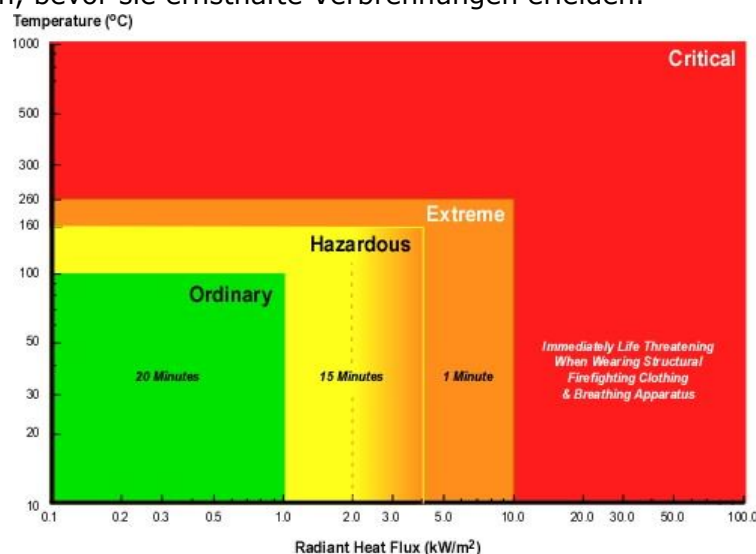


Bild 3 Die Grenzen der thermischen Belastung in Relation zur Strahlungshitze und zur Umgebungstemperatur. (Graphik: NIST)

4.2 Rauchgaseffekte

Rauch besteht im Einzelnen aus hunderten von verschiedenen Substanzen. Trotzdem kann der Effekt von Rauch auf den menschlichen Körper sehr gut veranschaulicht werden, indem man einen genaueren Blick auf gewisse „Schlüsselgase“ und deren Interaktionen wirft.

Rauch verursacht im menschlichen Organismus eine große Anzahl von Problemen :

- Rauch besteht zu großen Teilen aus Reizstoffen.
- Rauch besteht zu großen Teilen aus erstickenden Gasen (CO, CO², HCN, ...).
- Im Rauch ist meist nur ein geringer Anteil an Sauerstoff vorhanden.

Die Reizgase im Rauch greifen Augen und Lungen an. In hoher Konzentration verursachen sie ernsthafte Schmerzen. Hinzu kommt, dass Rauch sich lichtundurchlässig verhält. Das bedeutet, dass im Rauch nur eine geringe Sichtweite besteht. Umso dichter der Qualm ist, umso geringer ist die Sichtweite. All diese Eigenschaften machen es Menschen sehr schwer, durch Rauch zu laufen. Dabei spielt auch immer der Gesundheitszustand eines potenziellen Opfers eine wichtige Rolle. Ältere Menschen und Kleinkinder werden sehr viel schneller an den Folgen der chemischen Reizstoffe leiden, als körperlich fitte Erwachsene. Bei Personen mit Atemwegserkrankungen zeigen sich ebenfalls sehr viel schneller physische Probleme, wenn sie Brandrauch ausgesetzt werden.

Menschen, die Reizgasen ausgesetzt waren, können auch später noch eine Vielzahl gesundheitlicher Probleme entwickeln, lange nachdem sie mit dem Gas in Kontakt waren. Man sollte daher niemals davon ausgehen, dass die Gefahr für die Opfer vorüber ist, wenn sie aus dem Rauch geborgen wurden. Während den ersten 24 Stunden nach der Aufnahme der Substanzen, kann eine Lungenentzündung mit fatalen Folgen auftreten. Wenn solche Entzündungen adäquat behandelt oder im Vorfeld bereits gänzlich vermieden werden, erholen sich die meisten Opfer in den folgenden drei Monaten komplett. Erst wenn ein Brandopfer das Krankenhaus wieder verlassen darf, kann die Feuerwehr tatsächlich davon ausgehen, dass sie ein Leben gerettet hat. Meistens sind es die gemeinsamen Anstrengungen der gesamten Einsatzmannschaft, die es erst ermöglichen, ein Opfer lebend aus einem Hausbrand zu bergen. Anschließend sind es die medizinischen Dienste, denen die Aufgabe zufällt, das Opfer am Leben zu erhalten.

Rauch besteht auch teilweise aus CO. Bei einem Brand erreicht der CO-Anteil oft 5.000 bis 10.000 ppm. Dabei handelt es sich um enorm hohe Konzentrationen. CO verbindet sich mit dem Hämoglobin im Blut. Hämoglobin ist ein Protein, welches in den roten Blutkörperchen für den Sauerstofftransport zuständig ist. Hämoglobin kann mit einer endlosen Lastwagenkolonne verglichen werden, die Sauerstoff von der Lunge in andere Körperbereiche befördert. Wenn ein solcher Lastwagen mit CO beladen wurde, kann er keinen Sauerstoff mehr transportieren. Wenn zu viele dieser LKW mit CO anstelle von Sauerstoff beladen werden, wird die Sauerstoffzufuhr im Körper stark eingeschränkt. Der CO-Anteil wird in %COHb angegeben. Hohe CO-Konzentrationen im Blut sind die häufigste Todesursache bei Brandopfern.



Für Menschen wird hierzu die *Haber-Regel* angewandt. Die Regel besagt, dass bei einer CO-Vergiftung sowohl die Zeit eine Rolle spielt, während derer man dem Gas ausgesetzt ist, wie auch die Konzentration des CO in der Atmosphäre. Das bedeutet, dass eine Aussetzungsdauer von fünf Minuten bei einer Konzentration von 1.000 ppm, den gleichen Effekt auf den menschlichen Organismus hat, wie die Aufnahme einer Dosis von 500 ppm während zehn Minuten.

Rauchgase enthalten oft auch Cyanwasserstoff (HCN). Bei Bränden sind Konzentrationen von bis zu 1000 ppm möglich. HCN, auch als Blausäure bekannt, gilt als überaus giftiges Gas, seine Giftigkeit liegt 25 Mal höher, als die von CO. Der Effekt von HCN auf den menschlichen Organismus ist daher auch weitaus höher anzusetzen, als der von CO. Beides sind tödliche Gase, aber die Anwesenheit von HCN führt sehr viel schneller zum Bewusstseinsverlust, wodurch sich für die Opfer das überlebenswichtige Zeitfenster zur Flucht oder Evakuierung erheblich verkleinert. Darüber hinaus lässt sich die *Haber-Regel* nicht auf HCN anwenden. Menschen können bei einer HCN-Konzentration ab 200 ppm nicht mehr lange überleben.

Rauch enthält ebenfalls hohe Konzentrationen von CO₂. Dabei handelt es sich um ein Gas, welches den Körper zur Hyperventilation anregt. Diese wird durch einen natürlichen Reflex herbeigeführt, der zum Ziel hat, das überschüssige CO₂ über die Lungen aus dem Blutkreislauf abzuführen. Bei einer zu hohen Konzentration von CO₂ in der eingeatmeten Umgebungsluft, versucht der Körper durch die Erhöhung der Atemfrequenz, das Gas wieder auszustoßen. Es kommt zur Hyperventilation, welche wiederum dazu führt, dass andere toxische Gase noch schneller eingeatmet werden.

Die Sauerstoffkonzentration hingegen, ist im Rauch stark reduziert. Es bleibt meistens nicht mehr viel übrig von den anfänglich noch vorhandenen 21%. Eine niedrige O₂-Konzentration bedeutet eine lebensbedrohliche Situation. Während Haus- oder Wohnungsbränden ist das Überleben meist nur noch in Bodennähe möglich. Dort ist die Sauerstoffmenge in der Luft möglicherweise noch ausreichend, um einen Menschen am Leben zu erhalten. In der Rauchsicht ist dies unmöglich. Es wurden Messungen durchgeführt, die eine Sauerstoffkonzentration innerhalb der Rauchsicht von 1% zeigten. Hinzu kommen die hohen Temperaturen der Rauchgase. Menschen, die Rauch bei solchen Konzentrationen und Temperaturen einatmen müssen, haben nur noch sehr geringe Überlebenschancen. Es sind Fälle dokumentiert, in denen Leute die Türe zu einem Brandraum öffneten und sich unmittelbar danach im ausströmenden Rauch wiederfanden. Nach nur einem einzigen Atemzug brachen diese Personen zusammen und fielen bewusstlos zu Boden.

Rauch enthält noch eine ganze Anzahl anderer schädlicher Gase, wie beispielsweise Chlor, Stickstoff, Stickoxide oder Schwefelwasserstoff. Deren Anteil ist jedoch wesentlich von den Bestandteilen der Brandlast abhängig. In der Regel ist daher die Konzentration dieser Gase eher gering.

Grundsätzlich haben Rauchgase drei Effekte auf den menschlichen Körper :

1. Irritierende oder ätzende Gase behindern die Flucht oder Evakuierung. Die Augen beginnen zu Tränen und die Atemwege schmerzen sehr stark. Das kann dazu führen, dass Opfer kollabieren.



2. Die Konzentration der Gase, denen die Opfer ausgesetzt sind, kann zu einem Orientierungsverlust führen, gefolgt von Bewusstlosigkeit bis hin zum Tod. CO und HCN sind die wichtigsten Gase in diesem Zusammenhang.
3. Hohe Konzentrationen irritierender Gase können auch nach der Rettung eines Opfers vor dem Feuertod, immer noch weiter tödliche Krankheiten, wie Lungenentzündung oder Lungenödem hervorrufen.

75% der Opfer, die an einer Rauchvergiftung starben, wurden in Räumen aufgefunden, in denen das Feuer nicht ausgebrochen war. Das bedeutet, dass diese Menschen hauptsächlich durch das Inhalieren der tödlichen Gase verstarben. Professor David Purser entwickelte eine Methode zur Berechnung der tödlichen Effekte von Brandgase. Seine Forschung ergab eine Annäherung an die Dosis, die ein Mensch absorbiert: *the fractional effective dose (FED)*, die teilweise effektive Dosis. Er kommt zum Schluss, dass eine halbe Sekunde in einer Umgebung bei 1000 ppm nicht so schlimme Folgen hat, wie 10 Min. in einer Umgebung mit 100 ppm. Sobald die FED einen vorgegebenen Wert übersteigt, verliert das Opfer das Bewusstsein. Wenn die FED weiter ansteigt, stirbt das Opfer.

5 Erst die Opfer retten, dann das Feuer löschen?

Im vorherigen Absatz wird erklärt, wie Menschen durch die letalen Effekte der Rauchgase zu Tode kommen oder irreparable gesundheitliche Schäden erleiden. Der schnellste Weg, ihre Überlebenschancen zu erhöhen, ist die Opfer aus dem Rauch zu entfernen. Um dies zu erreichen, müssen die Opfer jedoch zuerst lokalisiert werden. Das ist allerdings nicht immer einfach und schnell zu realisieren, besonders in großen oder weitläufigen Gebäuden kann sich dies im dichten Rauch als schier undurchführbar erweisen. Zumal den Feuerwehrleuten nur eine begrenzte Menge Pressluft in ihren Flaschen zur Verfügung steht und sie diese so einteilen müssen, dass ihnen noch genügend Luft für den Rückweg übrig bleibt.

Eine andere Vorgehensweise, mit der sich die Überlebenschancen der Opfer erhöhen lassen, besteht darin, den Rauch aus den Räumlichkeiten zu entfernen. Um dieses Ziel in die Tat umzusetzen, muss die Feuerwehr die Räume belüften. Dabei werden sich die Rauchgase mit Frischluft vermischen und der Anteil toxischer und irritierender Gase wird absinken. Währenddessen wird allerdings die Sauerstoffkonzentration ansteigen, was wiederum drastische Konsequenzen auf den Brandverlauf haben kann, wenn das Feuer noch nicht gelöscht wurde.

Belüftung kann sich daher bei modernen Bränden als eine sehr gefährliche Taktik erweisen. Einzig bei der Bekämpfung von kleinen (schwelenden) Bränden, kann die Belüftungstechnik in relativer Sicherheit eingesetzt werden. Bei allen anderen, belüfteten oder unterbelüfteten Bränden, ist es sehr wichtig, prioritär die Brandbekämpfung einzuleiten. Der Erfolg des Löschversuches ist jedoch längst nicht immer garantiert, da bei Beginn des Angriffs oftmals der Brandherd nicht genau lokalisiert werden kann. Es ist nicht zu verantworten, eine Belüftungstechnik einzusetzen, bevor das Feuer nicht wenigstens lokalisiert wurde. Im ungünstigsten Fall könnte dadurch die Intensität des Feuers derart gesteigert werden, dass eventuelle Opfer, aber auch Feuerwehrleute, durch den einsetzenden Hitzestress sterben.



Wenn Menschenleben gerettet werden sollen, muss der Rauch aus den Räumen entfernt werden. (Überdruck)Belüftung ist naturgemäß die Lösung für dieses Problem. Um jedoch belüften zu können, ohne dass, bedingt durch die Luftzufuhr, die Intensität des Feuers, signifikant ansteigt, muss der Brand erst niedergeschlagen werden.

Nur so, lassen sich Menschenleben retten. Aufgrund des, in den letzten fünfzig Jahren rapide veränderten Brandverhaltens, kann die Feuerwehr nicht mehr länger retten, bevor sie zu löschen beginnt. Das Feuer muss erst gelöscht werden, sodass anschließend Belüftung und Menschenrettung (oder Menschenrettung und Belüftung) durchgeführt werden können.

First, put the fire out!

6 Quellennachweis

- [1] *Merci B (2010) Active fire protection: Smoke and heat control, course of the Post graduate Studies in Fire Safety Engineering, UGent*
- [2] *Gottuk D, Lattimer B (2016) Effect of combustion conditions on species production, in SFPE Handbook of fire protection engineering*
- [3] *Purser D (2016) Combustion toxicity, in SFPE Handbook of fire protection engineering*
- [4] *Galea E (2011) Human behavior in fire, course of the Post graduate Studies in Fire Safety Engineering, UGent*
- [5] *Lambert K, Baaij S (2018) Brandverloop: Technisch bekeken, tactisch toegepast, 2^{de} editie*

Karel Lambert

