

## **Feuerübersprung und Abbrandverhalten von Personenkraftwagen - Teil 1**

Bei der Bearbeitung gutachterlicher Stellungnahmen zu Brandschutzkonzepten für Garagen- und Tunnelanlagen stellt sich immer wieder die Frage nach einer realistischen Einschätzung des Brandverhaltens von Kraftfahrzeugen. Diese betrifft einerseits die anzunehmenden Freisetzungsraten von Rauch und Energie, das Rauchpotential als Beurteilungsgröße zur Einschätzung der sichttrübenden Wirkung des entstehenden Rauches wie auch die Frage eines Feuerübersprunges auf benachbart parkierte Fahrzeuge.

Gerade zu letztgenanntem Punkt werden sehr widersprüchliche Ansichten vertreten, die durch ebenso widersprüchliche Versuchsdaten wie Befunde bei realen Brandsituationen erhärtet werden. Experimentelle Daten wie 'kein Feuerübersprung für Fahrzeugabstände von 40 cm' /1/,/2/ und 'erfolgter Feuerübersprung bei einem Fahrzeugabstand von mehr als 80cm' /3/ lassen sich vermutlich nur ergründen, wenn sie im Zusammenhang mit der Anordnung der PKW zueinander im Raum oder dem Karosserie-Material (Metall, Kunststoff) der PKW gesehen werden.

Im Zuge des - vornehmlich experimentellen - Forschungsvorhabens werden an Fahrzeugen unterschiedlichen Karosseriematerials Energiefreisetzungsraten, der Rauchentstehungsanteil am Brandgut und ein mittleres Rauchpotential zu einzelnen oder mehreren brennenden PKW ermittelt. In einem Brandversuch mit drei nebeneinander geparkten PKW wird das Feuerübersprungsverhalten untersucht, wobei dieser Aspekt Schwerpunkt des zweiten Teils des Vorhabens sein wird.

Neben der Ermittlung der genannten Größen, die dringend benötigtes Datenmaterial für die rechnerische Simulation von PKW-Bränden und zur Aufstellung von Brandschutzkonzepten für Großgaragen und Tunnelanlagen bereitstellen, liegt ein Hauptgewicht der Auswertung auf der näherungsweise Charakterisierung der Verbrennungsprozesse mit Ableitung eines alternativen Verfahrens zu Ermittlung der Energiefreisetzung (auf der Basis der Sauerstoff-Kalorimetrie) und auf der Erfassung von Rauchgasmassen- und -volumenströmen und ihrer Bewertung hinsichtlich Reingas- und Reinluftanteilen.

Insofern liefert diese Arbeit auch wertvolle Anregungen zu dem wenig hinterfragten Themenkomplex, wieviel 'Brandrauch' welchem Brand zuzuordnen ist.

### **Einleitung und Legitimation**

Zur Beurteilung und Erstellung von Brandschutzkonzepten für Garagen- oder Tunnelanlagen wird sich zunehmend des Hilfsmittels der rechnerischen Brandsimulation bedient. Eine Abschätzung der infolge eines Brandes anzunehmenden Heißgastemperaturen, Rauchausbreitung und Sichtverhältnisse oder der zu erwartenden thermischen Bauteilbelastung wird dabei - unter Vorgabe der jeweiligen räumlichen Gegebenheiten (Geometrie, Stoffwerte von Umfassungsbauteilen, Ventilationsöffnungen oder maschinelle Rauchabsaugung, Lokalisation und Art des Brandherdes) - auf der Grundlage von Massen-, Energie- und Impulsbilanzen durchgeführt.

Wesentliche Eingabegröße aller derzeitig verfügbaren Brandsimulationsmodelle sind dabei die Energiefreisetzungsrate (oder die Abbrandrate) und die Entstehungsraten (als Massenanteile am Brandgut) von Verbrennungsprodukten sowie das Rauchpotential zur Einschätzung der sich trübenden Wirkung des entstehenden Brandrauches, da die Brandausbreitung und die Verbrennungsprozesse im einzelnen z.Z. noch nicht wirklichkeitstreu nachgebildet werden können.

Für Brände an Personenkraftwagen stehen derartige Kenndaten nur sehr vereinzelt und z.T. mit relativ großen Abweichungen zur Verfügung. Bei der Einschätzung einer wahrscheinlichen Energiefreisetzungsrate und Entwicklung der Brandherdausdehnung bei einem Garagenbrand stellen sich weiterhin die Fragen, ob von *einem oder mehreren* brennenden Fahrzeugen auszugehen ist, wann unter welchen Kriterien ein Feuerübersprung anzunehmen ist und wie sich der Energiefreisetzungsverlauf für mehrere brennende Fahrzeuge gestalten wird.

Bislang galt: Eine Brandübertragung auf Nachbarfahrzeuge tritt i.d.R. bei Fahrzeugabständen in der Größenordnung von 40 cm bis 80 cm *nicht* auf /1/, /2/ - solange nicht brennende Kunststoffe oder Treibstoff auf den Boden gelangen und sofern nicht besondere Ventilationsverhältnisse die Brandübertragung begünstigen. Mit zunehmendem Fahrzeugabstand ist eine Abnahme des Übersprungsrisikos wahrscheinlich. Kritischer ist jedoch - nach Auswertung aktueller Garagenbrände - der Brandübergreif auf ein benachbartes Fahrzeug mit Kunststoffkarosserie zu sehen. Z.B. in /3/,/4/ wird ein Feuerübersprung auf einen Trabant-Wagen in einer Tiefgarage (bei Windstille) über einen 80 cm großen Zwischenraum hinweg dokumentiert.

Auch bei modernen Kraftfahrzeugen nimmt der Anteil von Kunststoffteilen an der Karosserie unaufhaltsam zu. Der bislang in den Garagenverordnungen bei der Dimensionierung von Lüftungsanlagen zugrundegelegte Brandfall von bis zu *einem* brennenden PKW könnte bei Fortdauern dieser Entwicklung nicht mehr zeitgemäß sein und zu einer Unterdimensionierung der Anlage führen.

## **Zielsetzung**

Ziel der Forschungsarbeit ist die experimentelle Ermittlung des Abbrandverhaltens unterschiedlicher, z.Z. häufig im Straßenverkehr anzutreffender PKW-Typen sowie die Auflistung und Untersuchung markanter Größen beim Feuerübersprung von einem brennenden PKW auf ein benachbart parkendes Fahrzeug - zur Nutzung für die Einschätzung der Brandgefahren in Garagenanlagen.

Die untersuchten Personenkraftwagen entstammen der Mittel- und Kleinwagen-Klasse. Sie werden zu Typen zusammengefaßt und gemeinsam untersucht. So wird unterschieden zwischen Fahrzeugen mit Stahlkarosserie ('Stahl-PKW'), Fahrzeugen mit Kunststoffkarosserie ganz spezieller Art ('Trabant') und Fahrzeugen mit einer Karosserie neuerer Art mit etwas Stahl- und überwiegend Kunststoffteilen ('Kunststoff-PKW').

Exemplarisch für jeden dieser Wagentypen wird *ein* Fahrzeug zunächst *alleine* abgebrannt und hinsichtlich Pyrolyserate, Energiefreisetzungsrate, Rauchentstehungsanteil am Brandgut, mittleres Rauchpotential, Entstehungsraten von Kohlenmonoxid und -dioxid usw. erfaßt. Die Unterschiede zwischen einzelnen Fahrzeugen *eines* Typs werden nur durch das Anfangsgewicht und die *augenscheinlich* unterschiedliche Ausstattung dokumentiert. In einem

Brandversuch mit drei nebeneinander geparkten PKW wird das Feuerübersprungsverhalten untersucht, wobei dieser Aspekt erst Schwerpunkt des zweiten Teils des Vorhabens sein wird.

*Ergebnis* der Untersuchungen ist - neben einer Protokollierung von

- Feuerausbreitung und
  - Feuerübersprung -
- die Ermittlung
- der Pyrolyserate
  - der Energiefreisetzungsrate auf der Basis des Sauerstoffverbrauchs
  - des mittleren Rauchpotentials und des Rauchpartikelentstehungsanteiles am Brandgut
  - der Entstehungsraten von Kohlenmonoxid und -dioxid
  - der in Umgebung des Wagens auftretenden Wärmestromdichten.

Als Zwischenschritte in der Auswertung wird

- eine chemische Charakterisierung des momentan brennenden Brandgutes (Wasserstoff- zu Kohlenstoffatom-Verhältnis)
- eine Abschätzung der Freisetzungsrates von Wasserteilchen
- eine Bewertung des Feuchtegehaltes des Heißgases mit Korrektur der 'trocken' gemessenen Gaskomponenten in die Konzentrationen des 'feuchten' Heißgases
- eine Ermittlung des abgeführten Massenstromes zu dem gemessenen Volumenstrom
- eine Ermittlung der 'Reingas'-Entstehungsrate
- eine Aufschlüsselung des Reingas- zu Frischluft-Anteiles in den abgehenden Heißgasmassen

vorgenommen.

Hierzu sind die folgenden *Größen meßtechnisch zu erfassen*:

- der Masseverlust des Fahrzeugs (Pyrolyserate)
- die Geschwindigkeit, Temperatur und Sauerstoffkonzentration der durch den Schornstein ausströmenden Heißgase (Energiefreisetzungsrate aus der Oxygen Consumption)
- die Optische Dichte der Rauchgase bzw. der Transmissionsverlust eines 'Lichtstrahles' durch die Rauchgase und der Kohlendioxidgehalt (zur Ermittlung des Rauchpotentials)
- der Kohlenmonoxidgehalt (Sauerstoff-Unterversorgung der Verbrennung)
- Temperaturen im Heißgas und auf umgebende Wände, die benachbarten Fahrzeuge und 'Meßsteine' sowie die in diese Meßsteine eintretenden Wärmestromdichten (zu Ermittlung der Wärmebeaufschlagung der Nachbarfahrzeuge)
- die mit Heat-Flux-Meters ermittelten radiativen und konvektiven Wärmestromdichten.

Die Brandversuche werden außerdem durch Fotos und eine Video-Aufzeichnung dokumentiert (Brandherdausdehnung, Feuerübersprung).

Weiterhin sind zum Zeitpunkt des Feuerübersprunges festzuhalten

- die Mächtigkeit, optische Dichte (?) und Temperatur der Heißgasschicht
- die Oberflächentemperaturen des in Brand geratenden (Sekundär)Fahrzeuges
- die von Heat-Flux-Meters bzw. Meßsteinen gemessene Wärmestromdichte in Höhe des in Brand geratenden (Sekundär)Fahrzeuges - als Grundlage zur Umrechnung in die Wärmestromdichte in den PKW
- das Integral des durch die Heat Flux Meters gewonnenen Wärmeeintrages

als Grundlage zur Erarbeitung eines Kriteriums für einen Feuerübersprung - in Abhängigkeit vom jeweiligen sekundär in Brand geratenden Fahrzeug. Für diese Ergebnisse sei auf den Berichtsband zu Teil 2 verwiesen.

## **Auszüge aus der Bewertung der Versuchsergebnisse**

Die Brandversuche wurden in einem 35 m<sup>2</sup> großen und 4,5 m hohen Abbrandraum durchgeführt, an den ein 10 m hoher Schornstein mit 1 m<sup>2</sup> Querschnittsfläche angeschlossen ist. Selbstverständlich bestimmen diese äußeren Randbedingungen sowie die vorgegebene Ventilationsfläche von 3 m Breite und 1,5 m Höhe die Bedingungen zum Heißgasabzug, zur Ausbildung einer Heißgasschicht sowie zur Sauerstoffversorgung der Verbrennungsregion. Die ermittelten Abgasströme bilden daher kein auf andere Szenarien direkt übertragbares Versuchsergebnis, sondern sind unter Beachtung dieser Gegebenheiten zu beurteilen. Der Brandraum ist mit einer über die gesamte Grundfläche reichenden Wiegebühne ausgestattet.

Die ersten vier Brandversuche des Forschungsvorhabens erbrachten eine Reihe wertvoller Erkenntnisse, obwohl der Hauptversuch Nr.4 mit den drei PKW wegen eines Ausfalls in der Meßtechnik nicht so erfolgreich gewertet werden konnte wie erwünscht.

Gewonnen wurden direkt aus der Versuchsbeobachtung und den Meßwerten:

- Erkenntnisse zum Brandablauf, zu Feuerausbreitung und Brandheftigkeit, zu den zu erwartenden Brandraumtemperaturen, den Temperaturentwicklungen im Fahrzeug, der Wärmebelastung im Bereich flankierend stehender Wagen. Hierzu gehören auch Zeitpunkte zum Aufbrechen von Ventilationsöffnungen, zum Eintritt von Reifenbränden.

Die theoretische Auswertung der Meßergebnisse erbrachte:

- Informationen über den Energiefreisetzungsverlauf, über die Freisetzunganteile einzelner chemischer Komponenten im Vergleich zum Sauerstoffverbrauch und damit über eine Bilanz zu den chemischen Verbrennungsprozessen, über die entstehenden Heißgasmassen- und -volumenströme, über die Mischungsverhältnisse von reiner Frischluft zu Primärgas in diesen Massenströmen, über die Rauchpotentiale und über die mittleren Heizwerte, über die Bewertung eines solchen PKW-Brandes im Versuchsraum im Vergleich zum ETK-Brand.

Im folgenden werden anhand von hier nur ganz kurz erläuterten Tabellen einige Versuchsergebnisse wiedergeben.

### Brandverlauf und Brandintensität:

In den ersten drei Versuchen wurden jeweils Einzelfahrzeuge in Brand gesetzt. Sie unterschieden sich (gemäß Tab. 1) vor allem durch das verwendete Karosseriematerial; repräsentierend für die Typen Tr, St, Ku wurden in dieser Reihenfolge ein Trabant, Modell Limousine, ein Rover-Austin, Modell Metro LS, und ein Citroën, Modell BX 16 RE Classic, untersucht.

Die Art der Zündung (gleichzeitige Zündung beider mit je 250 ml Isopropanol beträufelter Vordersitze) sowie die Ventilationsbedingungen (schlitzbreit geöffnete Fenster) für die in Brand gesteckten PKW waren durchaus vergleichbar. Das gilt auch für zusätzliche Brandlasten (Reserverad, etwa 15 l Sprit im Tank mit nicht fest verschlossenem Deckel) oder

entfernte Brandlasten (Batterie). Das Gewicht und die Abmessungen des dritten Fahrzeugs (Ku) waren etwa 30% größer als bei den anderen Wagen. Beim ersten Wagen (Tr) mußten zur Anfachung des Feuers die Ventilationsöffnungen vergrößert werden.

Trotz der vergleichbaren Vorgaben unterschieden sich die Brandverläufe dieser drei PKW-Brände erheblich (Tabelle 1):

*Tabelle 1:* Brandverhalten der PKW (erste drei Versuche)

	Tr (Vers. 1)	St (Vers. 2)	Ku (Vers. 3)
Branddauer (abgesehen von Reifen und kleineren Herden) [Min]	23	60	50
Zeitpunkt beginnender Scheibenverluste [Min]	6	18	2,5
Zeitpunkt beginnenden Vollbrandes [Min]	8	18	11
Zeitpunkt beginnender Reifenbrände [Min]	12	24	13,5
Maximale Temperatur im Fahrzeug [°C]	-	950-1000	1100
Färbung des Rauches	dunkel, ab 10. Min hell, ab 16. Min dunkel	hell	tiefdunkel, ab 16. Min heller, ab 30. Min dunkler

Hinsichtlich des Brandverlaufes entwickelt sich das Geschehen gleichermaßen so, daß das Feuer im Innenraum sich zunächst unter Nutzung des hier vorhandenen Sauerstoffes gut entwickelt; dünner Brandrauch tritt durch die Ventilationsöffnungen; der Innenraum verdunkelt sich als Zeichen unvollständiger, stärker rußender Verbrennung; die Größe und Form der Ventilationsöffnungen entscheidet darüber, ob ausreichend Zuluft in den Fahrgastraum geführt werden kann, um das Feuer nicht zu ersticken oder eine gleichbleibend fortgesetzte Verbrennung zu ermöglichen, bei der sich der Innenraum so weit aufheizt, daß Scheiben zu Bruch gehen können, oder ob gar eine Intensivierung des Brandes möglich ist, bei der dann Flammenzünglein aus den Fensterschlitten treten und diese durch thermische Spannung zerspringen lassen; von diesem Moment an intensiviert sich der Brand im Innenraum erheblich; andere Scheiben folgen nach; die Flammen streifen nach oben über das Wagendach, ergreifen hier den Lack, der eine sich langsam vorarbeitende Flammenfront über das Wagendach hinweg transportiert; die Dichtungsbänder um Scheiben und Türen beginnen, brennend herabzufallen/-zuhängen und belasten damit tieferliegende Lackbereiche; Flammen treten aus den Türrahmen und Lüftungsschlitten zum Motorraum aus, Flashover, Flammen schießen aus den Kotflügelbereichen oder Motor- und Kofferraumbereichen hervor. Es können sich Hauben oder Türen öffnen; pneumatische Fensterheber und ähnliches wird vom Brandherd fortgeschleudert; die Reifen verlieren zischend oder knallend Luft. Ein Flammenmeer entzieht das Fahrzeug der weiteren Beobachtung.

### Brandauswirkungen im Raum:

Tabelle 2 faßt die Auswirkungen des Brandes hinsichtlich der räumlich gegebenen Bedingungen knapp zusammen. In diese Versuchsergebnisse gehen die Raumhöhe (Einmischungen in den Plume und damit Temperaturen, Konzentrationen) und -ausdehnung (m-Faktorelement), die Lage der Meßstellen (Heißgastemperaturen), die Anordnung der Wärmestromdichtemeßgeräte, die Fuchsanordnung und die Schornsteinhöhe (ein- und ausfließende Massen- und Volumenströme) usw. ein.

Tabelle 2: Brandauswirkungen im Versuchsraum (erste drei Versuche)  
(die Abgaswerte und Konzentrationsangaben beziehen sich auf das Gas im Schornstein)

	Tr (Vers. 1)	St (Vers. 2)	Ku (Vers. 3)
Äquivalente Branddauer [Min]	16	12	23
Maximale Heißgastemperatur [°C]	700	390	780
Zeitpunkt maximaler Heißgastemperatur [Min]	13.	33,5.	17.-30.
Maximale Plumetemperatur [°C]	1000	440	950
Maximale Wärmestromdichte Heat Flux [kW/m <sup>2</sup> ]	47	22	140
Maximaler Abgas-Massenstrom [kg/s]	2,8	3,0	3,3
Maximaler Abgas-Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]	5,0	4,5	7,0
Teilchen-Mischungsverhältnis im Abgas Reinluft : Reingas [-]	68 : 32	81,5 : 18,5	47 : 53
Maximale Heißgastemperatur im Schornstein [°C]	420	280	545
Konzentration Kohlenmonoxid [ppm]	2700	510	3500
Konzentration Kohlendioxid [Vol-%]	5	2,7	7,6
Konzentration Sauerstoff [Vol-%]	14	17	9,7

Im Vergleich der Tab. 1 mit der Tab. 2 überrascht es fast, daß der Brand Ku mit einer äquivalenten Branddauer von 23 Minuten als kräftigster bewertet wird. Hier werden auch die höchsten Gastemperaturen im Brandraum gemessen, die über einen längeren Zeitraum von etwa 14 Minuten fast konstant bleiben. Die von den Heat Flux Meters registrierte Wärmebelastung

wurde für diesen Versuch mit  $140 \text{ W/m}^2\text{K}$  gleich 3-mal so hoch gewertet wie für den ebenfalls sehr heftigen Brandversuch Tr.

Daß für den Tr-Brand die höchsten Plumetemperaturen ermittelt wurden, ist nicht weiter verwunderlich, da das Wagendach ebenfalls Brandlast war und damit nach gewisser Zeit der PKW nach oben völlig offen war.

Bei dem Brand St mit dem Stahlkarosserie-PKW erreichten die maximalen Gastemperaturen nur die Hälfte der Werte des Ku-Autos. Die halbe äquivalente Branddauer gegenüber dem Ku-PKW entspricht hinsichtlich der seitlichen Energieübertragung nur einem guten Sechstel an Wärmestromdichte.

#### Charakteristische Brandgrößen:

In Tabelle 3 sind die charakteristischen Kenngrößen der Brände wiedergegeben, die auch als Eingabegrößen zur rechnerischen Brandsimulation herangezogen werden können. Der Versuch Nr. 4 mit bis zu drei brennenden PKW ist dabei nur eingeschränkt nutzbar, da die Auswertung nur bis zur 36. Brandminute durchgeführt werden konnte.

Tabelle 3: Charakteristik des Brandgutes bzw. des Brandes (erste vier Versuche)

	Tr (Vers. 1)	St (Vers. 2)	Ku (Vers. 3)	Versuch 4
Brandlast $M$ [kg]	695	893	1067	1570
H:C-Teilchenverhältnis $m:n$ [-]	1,2	1,0-1,4	1,1-1,6	1,6-2,1
Rauchpotential $\chi$ [ $\text{m}^2/\text{g}$ ]	5; 0,2-0,6	3; 0,5-2,0	1,5; 0,4-0,7	2; 0,6
Rauchpartikel-Entstehungsanteil $Y_R$ [g/g]	0,05	0,06	0,09	0,2; 0,06
Unterer Heizwert $H_u$ [MJ/kg]	31	29,6	29,6	25-31
Maximale Energiefreisetzungsrate $\dot{E}$ [MW]	3,7	1,7	4,6	10
Insgesamt freigesetzte Energie $E$ [GJ]	3,1	3,2	8	-

Die bei einem Brand insgesamt freisetzbare Energie kann für einen Kleinwagen mit Stahlkarosserie sowie für einen Trabant mit gut 3 GJ angegeben werden. Darf über die Wagenlänge oder über das Wagengewicht extrapoliert werden, so könnte (ausgehend von dem Ergebnis für den Citroën) für einen *Kleinwagen* mit Kunststoffkarosserie etwa das Doppelte, also 6 GJ, angenommen werden. Für einen *Mittelklassewagen* mit Stahlkarosserie würden umgekehrt etwa gut 4 GJ anzunehmen sein.

### Wärmestromdichten und Feuerübersprung:

Abschließend seien in Tabelle 4 die Größen zusammengefaßt, die zum jeweiligen Zeitpunkt des Feuerübersprungs herrschten und möglicherweise im Zusammenhang mit dem Feuerüberschlag zu sehen sind. Diese Werte sollten mit Vorbehalt betrachtet werden, da dieser Brandversuch mit einem Ausfall des einen (von vier) Datenloggers behaftet war und manche eingehende 'Meß'größe theoretisch hergeleitet werden mußte.

Im derzeit in Bearbeitung befindlichen Bericht zum zweiten Teil des Forschungsvorhabens mit den Brandversuchen zum Feuerübersprung sind hierzu tragfähigere Werte enthalten.

Tabelle 4: Feuerübersprung auf Trabant und auf Fiesta - im Versuch 4

	Trabant	Fiesta
Brand-Zeitpunkt [Min]	29,7	31,7
Oberflächentemperatur ( $\approx$ -temperaturerhöhung) [°C] bzw. [K]]	283	391
Heat Flux Wärmestromdichte [kW/m <sup>2</sup> ]	(32,7)	(84)
Wärmestromdichte in Fahrzeuglack [kW/m <sup>2</sup> ]	((4,5))	-
Energieeintrag in Heat Flux [MJ/m <sup>2</sup> ]	(19,2)	(25,6)
Energieeintrag in Fahrzeuglack [MJ/m <sup>2</sup> ]	((4,2))	-

### Literatur

- /1/ Report of BHP Melbourne Research Laboratories: *Fire and Unprotected Steel in Closed Carparks*. Report No. MRL/PS98/87/001, ISBN 0731622251, Melbourne, 1988.
- /2/ Bürgi, H.: *Brandversuche an parkierten Fahrzeugen in einem geschlossenen Gebäude vom 10.4.1970 im Gebäude der ehemaligen Schokoladenfabrik 'Amor' in Bern*. Geo 4.5.88, 1988.
- /3/ *Drei Autos brannten in der Tiefgarage*. Leipziger Volkszeitung LVZ vom 13.2.1996.
- /4/ Steinert, C.; Jank, W.: *Feuerübersprung beim PKW-Brand in einer Tiefgarage in Leipzig am 13.2.1996*. vfdb 4/97, 1997.

Forschungsbericht: abgeschlossen Dezember 1998, 173 Seiten, ISBN-Nr. 3-8167-5446-5

Förderer: SMWK (Sächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kunst)

Ausführende Stelle: MFPA Leipzig e.V. (Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig e.V.)