

Prof. Dr. rer. nat. Hans Hölemann

Der Brandbegriff im Versicherungswesen aus  
naturwissenschaftlicher und technischer Sicht

Herausgeber:  
Hamburger Gesellschaft  
zur Förderung des Versicherungswesens mbH  
Abteistraße 15  
D-2000 Hamburg 13

Heft 6

Hans Hölemann

Der Brandbegriff im Versicherungswesen aus  
naturwissenschaftlicher und technischer Sicht

### Zusammenfassung

Der im Versicherungswesen bis heute gültige Brandbegriff wurde bei der Aufstellung der allgemeinen Feuerversicherungsbedingungen (AFB) vor 1930 nach Vorbildern vom Anfang dieses Jahrhunderts formuliert. In die inzwischen abgeschlossene Überarbeitung der AFB (AFB 87) hat man diesen Brandbegriff nahezu unverändert übernommen. Im Zusammenhang mit der Überarbeitung sollte untersucht werden, welche Probleme sich bei der Auslegung dieser, im Versicherungswesen historisch gewachsenen Branddefinition aus naturwissenschaftlicher und technischer Sicht ergeben und ob Widersprüche zu den inzwischen weiterentwickelten Vorstellungen über Verbrennungsprozesse bei Bränden auftreten.

In der vorliegenden Arbeit wird zunächst der Brandbegriff der AFB anderen genormten Brandbegriffen, vorwiegend aus dem Feuerwehrwesen und aus dem Bereich der Materialprüfung gegenübergestellt. Die naturwissenschaftlichen Grundlagen der Verbrennungsvorgänge einschließlich der für die genannten Begriffsbestimmungen wichtigen äußeren Erscheinungsformen des Feuers werden erläutert. Hier zeigt sich, daß vor allem das Merkmal "Lichtemission", das allgemein als konstitutiv für die Vorstellungen vom Feuer angesehen wird, im Grenzbereich zu Schwelprozessen Probleme macht.

Die vielfältigen Parameter für die Zündung (Entstehung außerhalb eines bestimmungsgemäßen Herdes) und Ausbreitung von Bränden werden zusammengestellt und an Beispielen erläutert. Für die wissenschaftlich technische Forschung auf diesem Gebiet haben sich exemplarische Brandszenarien als besonders aussagekräftig erwiesen. Es wird dargelegt, daß die Formulierung "unkontrollierte Ausbreitung" im Vergleich zu dem im AFB-Begriff enthaltenen Merkmal "Ausbreitung aus eigener Kraft" zu bevorzugen ist.

Die Abgrenzung der vom Versicherungsschutz ausgeschlossenen

"Sengschäden" macht auch aus naturwissenschaftlicher Sicht keine Schwierigkeiten. Dagegen sind bei den ebenfalls nicht versicherten "Betriebsschäden" vor allem Fragen des wirtschaftlichen Risikoausgleichs zwischen Versicherern und Versicherungsnehmern betroffen. Die in diesem Bereich auftretenden Abgrenzungsprobleme sind nur in enger interdisziplinärer Kooperation zwischen Versicherungswissenschaft, Naturwissenschaft und Technik zu lösen und können in dieser Arbeit nur angedeutet werden.

## **Inhaltsverzeichnis**

	<b>Seite</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>II</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Zum gegenwärtigen Verständnis der Begriffe Verbrennung, Feuer und Brand</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Vorbemerkungen</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Der Brandbegriff der AFB und seine Unterbegriffe</b>	<b>6</b>
<b>2.3 Brandbegriffe außerhalb der AFB</b>	<b>11</b>
<b>3 Formen der Verbrennung</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Verbrennung in Flammen</b>	<b>19</b>
<b>3.1.1 Mischungsbedingungen</b>	<b>19</b>
<b>3.1.2 Strömung in Flammen</b>	<b>27</b>
<b>3.1.3 Aggregatzustand des brennbaren Stoffs</b>	<b>35</b>
<b>3.2 Verbrennung kompakter fester Stoffe</b>	<b>36</b>
<b>4 Chemische Reaktionen bei Verbrennungsvorgängen</b>	<b>48</b>
<b>4.1 Oxidation</b>	<b>48</b>
<b>4.2 Kettenreaktionen</b>	<b>55</b>
<b>5 Energieumsatz bei einem Brand</b>	<b>61</b>
<b>5.1 Wärmeentwicklung</b>	<b>61</b>
<b>5.2 Wärmeübertragung</b>	<b>69</b>
<b>5.2.1 Wärmetransport durch Wärmeleitung</b>	<b>72</b>
<b>5.2.2 Wärmetransport durch Konvektion</b>	<b>73</b>
<b>5.2.3 Wärmetransport durch Strahlung</b>	<b>74</b>
<b>5.3 Wärmeentwicklung und Wärmeableitung in einem Brand</b>	<b>78</b>
<b>5.4 Temperatur und Lichtemission</b>	<b>83</b>

6	Ausbreitung des Brandes	87
6.1	Ausbreitung "aus eigener Kraft"	87
6.2	Parameter für Zündung und Ausbreitung	91
6.2.1	Materialeigenschaften	91
6.2.2	Zündquellen	97
6.3	Brandszenarien	101
7	Sonderprobleme	105
7.1	Sengschäden	105
7.2	Betriebsschäden	105
7.3	Verbrennungsähnliche Vorgänge, Verbrennung unter abweichenden Bedingungen	110
8	Schlußbemerkungen	115
9	Literaturverzeichnis	117

## 1 Einleitung

Nach den im "Gesetz über den Versicherungsvertrag" (VVG) vom 30. Mai 1908 erlassenen Bestimmungen für die Feuerversicherung (§§ 81 - 107 c) haftet der Versicherer für Schäden durch Brand, Explosion und Blitzschlag. Im Fall eines Brandes hat der Versicherer den durch die Zerstörung oder Beschädigung der versicherten Sachen entstehenden Schaden zu ersetzen, soweit die Zerstörung oder Beschädigung auf der Einwirkung des Feuers beruht oder die unvermeidliche Folge des Feuers ist. Darüber hinaus hat er für die Schäden aufzukommen, die durch Löschen, Niederreißen oder Ausräumen verursacht werden, bzw. auch für versicherte Gegenstände, die bei einem Brand abhanden kommen.

Die Verfasser des Gesetzes verzichteten auf eine Begriffsbestimmung der schädigenden Ereignisse Brand, Explosion und Blitzschlag. In der Folgezeit wurde das Fehlen eines verbindlichen Brandbegriffs als wesentlicher Mangel empfunden. Soweit man eine Interpretation des Begriffes **Brand** für erforderlich hielt, stützte man sich zunächst vor allem auf herrschende Verkehrsauffassungen bzw. auf das umgangssprachliche Verständnis. Dies führte bei gerichtlichen Auseinandersetzungen zu durchaus unterschiedlichen Urteilen (STÖR, 1909). HELMER (1930) hat die daraus resultierenden Konflikte in seiner Dissertation "Der Brandbegriff und die unechten Schäden in der deutschen Feuerversicherung" ausführlich dargestellt.

Bei der Aufstellung der **Allgemeinen Feuerversicherungsbedingungen (AFB)** einigte man sich auf die an Vorschlägen von STÖR (1909) und VON GIERKE (1912) orientierte Begriffsbestimmung, die von 1930 bis Ende 1987 unverändert galt und von den Versicherern und Versicherungsnehmern bis in die Nachkriegszeit akzeptiert wurde:

"Als Brand gilt ein Feuer, das ohne einen bestimmungsmässi-

gen Herd entstanden ist oder ihn verlassen hat und sich aus eigener Kraft auszubreiten vermag (Schadenfeuer). Sengschäden, die nicht durch einen Brand entstanden sind, sowie Schäden, die an den versicherten Sachen dadurch entstehen, daß sie einem Nutzfeuer oder der Wärme zur Bearbeitung oder zu sonstigen Zwecken (z.B. zum Räuchern, Rösten, Kochen, Braten, Trocknen, Plätten) ausgesetzt werden, fallen nicht unter den Versicherungsschutz."

Um 1960 entstanden neue Diskussionen über den Brandbegriff, insbesondere im Zusammenhang mit der Regulierung von Schäden in der Industriefeuerversicherung. Diesen Schäden lagen Schadenereignisse zugrunde, die einerseits durchaus als Brände oder mindestens als brandähnliche Erscheinungen aufzufassen waren, die aber andererseits mit der aus einer recht konservativ geprägten Vorstellungswelt stammenden Branddefinition nur mit Mühe zur Deckung gebracht werden konnten. Exemplarisch sei hier an die Auseinandersetzung um die sogenannten "Eisenbrände" (VOSSEN, 1968; WÄLDER 1971) erinnert. Die z.T. neuen Interpretationen des Brandbegriffes im Rahmen dieses Streites sollen in die folgende Untersuchung einbezogen werden.

Obwohl es also insbesondere in der Industriefeuerversicherung Probleme bei der Anwendung dieses Brandbegriffes gab, behielt man in der überarbeiteten Fassung der AFB (AFB 87) die bisherige Struktur bei und beließ es bei geringfügigen Änderungen, die einer Klarstellung dienten:

"Brand ist ein Feuer, das ohne einen bestimmungsgemäßen Herd entstanden ist oder ihn verlassen hat und das sich aus eigener Kraft auszubreiten vermag."

Den Verfassern des Brandbegriffs von 1930 waren natürlich einschlägige, aus der langjährigen vorangegangenen Diskussion bekannte Abgrenzungsprobleme bewußt (RAISER, 1937). Schon vor der Einfüh-

rung des verbindlichen Brandbegriffs hat man die sog. Betriebschäden, "... Schäden, die an den versicherten Sachen dadurch entstehen, daß sie einem Nutzfeuer oder der Wärme zur Bearbeitung oder zu sonstigen Zwecken (...) ausgesetzt werden ..." i.a. von der Ersatzpflicht ausgeschlossen. Weitere Risikoausschlüsse und Risikoeinschlüsse, die einen direkten Bezug zum Brandbegriff haben, sind in "Klauseln, die von Fall zu Fall zugestanden werden können", enthalten.

Die Klauseln für den Ausschluß von Betriebsschäden und Sengschäden lauten in der Neufassung der AFB folgendermaßen:

"Die Versicherung erstreckt sich nicht auf

- a) Brandschäden, die an den versicherten Sachen dadurch entstehen, daß sie einem Nutzfeuer oder der Wärme zur Bearbeitung oder zu sonstigen Zwecken ausgesetzt werden; dies gilt auch für Sachen, in denen oder durch die Nutzfeuer oder Wärme erzeugt, vermittelt oder weitergeleitet wird;
- b) Sengschäden, außer wenn diese dadurch verursacht wurden, daß sich eine versicherte Gefahr gemäß Nr. 1 verwirklicht hat \*).

In die Erörterungen um den Brandbegriff wurden auch früher schon naturwissenschaftliche Vorstellungen über die im Feuer ablaufenden chemischen Reaktionen einbezogen (HELMER, 1930). Nun haben sich aber die Kenntnisse über die integrierten chemischen und physikalischen Prozesse bei Verbrennungsvorgängen in den Jahrzehnten seit Aufstellung des Brandbegriffs stark erweitert, so daß nicht nur die Entwicklung der Technik und dadurch veränderte Risiken, sondern auch weiterentwickelte naturwissenschaftliche Anschauungen dazu zwingen, die Relevanz des Brandbegriffes von Zeit zu Zeit zu überdenken.

---

\*) Versicherte Gefahren sind Brand, Blitzschlag, Explosion usw.

Die anschaulich sehr einfache und einleuchtende Beziehungskette Brand - Feuer - Verbrennung - Oxidation hat gelegentlich dazu verführt, die Formulierung eines ausschließlich naturwissenschaftlich-technisch begründeten Brandbegriffs zu fordern, dessen Merkmale den Brandbegriff des Versicherungswesens einschließen könnten (JACH, 1966). Dagegen hat bereits RAISER in seinem Kommentar zu den AFB (1937) betont: "Dabei (bei der Begriffsbestimmung des Brandes) handelt es sich nicht um die Übernahme eines anderweitig, etwa durch die Naturwissenschaft gegebenen, sondern um die Festlegung eines lediglich dem Rechte der Feuerversicherung angehörenden Begriffs."

Diese vorgegebene Zweckbestimmung darf aber nicht dazu führen, daß Widersprüche zwischen den Merkmalen des Brandbegriffs und ihren Interpretationen und naturwissenschaftlich-technischen Vorstellungen auftreten. Sonst sind in Zweifelsfällen und bei Abgrenzungsproblemen, die ja häufig nur durch einschlägige Sachverständigengutachten zu klären sind, Mißverständnisse unvermeidlich. Daß auch die Versicherungswissenschaft sich häufig mit den naturwissenschaftlichen und technischen Aspekten des Brandbegriffs auseinandersetzen hat, zeigen die zahlreichen Kommentare, die sich bis in die neueste Zeit zu den damit verbundenen Fragen äußern (FALCKENBERG, 1973; WUSSOW, 1975; HERDT, 1978; SBLOWSKI, 1981; MARTIN, 1986; PRÜLSS/MARTIN, 1988).

Nachfolgend wird der Brandbegriff des Versicherungswesens anderen Brandbegriffen gegenübergestellt und anhand neuerer, allerdings vereinfacht dargestellter naturwissenschaftlicher Erkenntnisse betrachtet. Vor allem das Merkmal "Feuer" wird dabei im Vordergrund stehen. Die Vereinfachungen sind erforderlich, da viele über die Verbrennung entwickelte Modellvorstellungen einen erheblichen mathematischen Aufwand voraussetzen, der hier nicht wiedergegeben werden kann. Die Untersuchung soll der interdisziplinären Verständigung dienen und eine Entscheidung darüber erleichtern, ob der vom Versicherungswesen angewendete Brandbegriff modifiziert werden sollte oder nicht.

## 2 Zum gegenwärtigen Verständnis der Begriffe Verbrennung, Feuer und Brand

### 2.1 Vorbemerkungen

Die Kenntnisse über die Verbrennung vor allem in Flammen, aber auch über die Verbrennung an der Oberfläche fester Stoffe haben sich in den letzten Jahrzehnten durch intensive Forschung stark erweitert. Bei den Untersuchungen interessierten vorwiegend die grundlegenden Vorgänge in Flammen sowie die Verbesserung der Energieausbeute und die Verminderung des Schadstoffausstoßes von technischen Feuerungsanlagen. Allerdings war die allgemeine chemische Forschung kaum an der Klärung dieser Probleme beteiligt. Die Flammen- und Verbrennungsforschung wird in wenigen Instituten der physikalischen Chemie sowie überwiegend in technisch-chemischen Instituten betrieben. Auch die Literatur für diesen Bereich hat sich stark spezialisiert; das meiste erscheint in englischer Sprache (z.B. LEWIS/VON ELBE: *Flames and Explosions of Gases*, 1951; FRISTROM/WESTENBERG: *Flame Structure*, 1965; GÜNTHER: *Verbrennung und Feuerungen*, 1974; *Symposia (International) on Combustion*, jährlich; Zeitschriften: *Combustion and Flame*, monatlich; *Brennstoff-Wärme-Kraft*, monatlich; *Chemie-Ingenieur-Technik*, monatlich). Mehr am Rand des Interessenspektrums werden in diesem Zusammenhang auch brandtypische Verbrennungsprozesse untersucht.

Bei Durchsicht der technisch-wissenschaftlichen Literatur fällt rasch auf, daß der allgemeine Ausdruck **Feuer** \*) im Zusammenhang mit Grundlagen-Fragestellungen und technischen Verbrennungen kaum noch gebraucht wird. Der Begriff hat eine viel ausgeprägtere Bedeutung im Brandschutz- und Versicherungswesen und wird hier eindeutig im Sinne des Gegensatzpaares **Nutzfeuer** -

---

\*) Von der Bedeutung der Begriffe **Feuer** in der Umgangssprache bzw. **Verbrennung** im Sinne der Körperverletzung sei hier abgesehen.

**Schadenfeuer (Brand)** verwendet (siehe die in Abschnitt 2.3 zitierten Begriffe). Anders ausgedrückt: In der Feuerungstechnik, die sich inzwischen zu einer selbständigen Spezialdisziplin entwickelt hat, geht man davon aus, daß Feuer nützlich ist, spricht dann aber von Verbrennung, Feuerung bzw. Feuerungsanlage. Das Schadenereignis **Brand** wird auch begrifflich zunächst nicht in Betracht gezogen.

## **2.2 Der Brandbegriff der AFB und seine Unterbegriffe**

Der Brandbegriff der AFB enthält eine Reihe von Merkmalen, die erfüllt sein müssen, um einen Brand als Schadenereignis zu definieren:

### **Der Brand**

- 1) ist ein Feuer
- 2) außerhalb eines bestimmungsgemäßen Herdes;
  - 2.1) das Feuer hat entweder seinen Herd verlassen  
oder
  - 2.2) ist ohne einen Herd entstanden.
- 3) das Feuer muß sich aus eigener Kraft ausbreiten können.

### **Kein Brand**

- 4) sind Sengschäden, die nicht durch einen Brand entstanden sind;  
  
sowie
- 5) Betriebsschäden d.h. Schäden an Gegenständen, die

5.1) betriebsmäßig einem Nutzfeuer ausgesetzt sind,

bzw.

5.2) die betriebsmäßig oder zu sonstigen Zwecken der Wärme ausgesetzt sind.

4) und 5) fallen nicht unter den Versicherungsschutz.

Der Brandbegriff ist nach VOSSEN (1968) nur erfüllt, wenn es sich "1. um ein Feuer handelt, das 2. Schaden stiftet, ...". Nach FALCKENBERG (1973) ist ein Schaden zwar die typische Folge eines Brandes, aber nicht dessen Voraussetzung. Der dem früheren Brandbegriff hinzugefügte Klammerausdruck "Schadenfeuer" diente lediglich der Klarstellung und lieferte kein zusätzliches Bestimmungsmerkmal. In den AFB 87 hat man auf diesen erläuternden Ausdruck verzichtet.

Von den Merkmalen des Brandbegriffs ist vor allem der Begriff **Feuer** (einschließlich seines Ausbreitungsvermögens) unter naturwissenschaftlichen Gesichtspunkten interpretierbar. Der größte Teil der Arbeit wird sich daher mit diesem Begriff befassen. Weiterhin lassen sich klare Aussagen zum Begriff **Sengschäden** treffen. Die übrigen Teilbegriffe müssen eher unter anderen Gesichtspunkten diskutiert werden, z.B. die Abgrenzung eines für das Feuer (Nutzfeuer) vorgesehenen Herdes oder Raumes. Dennoch enthalten auch diese mehr technisch bestimmten Merkmale naturwissenschaftliche Aspekte.

Im folgenden sollen einige aus dem Versicherungswesen, bzw. aus der Versicherungswissenschaft stammende Kriterien zur Charakterisierung der Begriffe **Brand** und **Feuer** aufgeführt werden, die einen Bezug zu naturwissenschaftlichen Fragestellungen haben und bei deren Erörterung man sich naturwissenschaftlicher Argumentationsweisen bedient.

Schon recht früh wurde akzeptiert, daß ein Feuer nicht unbedingt die Bildung von Flammen erfordert, und daß der Verbrennungsprozeß und damit das Feuer auch bloße Glut bzw. Glimmen umfaßt (siehe HELMER, 1930). Allerdings wird zwingend die Emission von Strahlung im sichtbaren Spektralbereich, also von Licht gefordert und damit eine deutliche Grenze zu (verbrennungsähnlichen) Vorgängen gezogen. Thermische Reaktionen, insbesondere Selbsterhitzungsvorgänge, z.B. durch Gärung oder Fermentation, bei denen nur Wärme entsteht, werden nicht als Brand angesehen, solange es nicht zur Selbstentzündung kommt.

Im Streit um die sog. "Eisenbrände" stellte VOSSEN (1968) folgende allgemeine Definition auf:

- "Feuer ist
- (a) eine Oxydation, d.h. die Verbindung eines beliebigen Stoffes mit dem Sauerstoff der atmosphärischen Luft, die
  - (b) unter Lichterscheinung,
  - (c) als exothermer Vorgang, d.h. unter Wärmebildung,
- und
- (d) mit einer Reaktionsgeschwindigkeit in der Größenordnung von einigen wenigen cm/sec vor sich geht."

VOSSEN forderte darüber hinaus, daß zum Begriff des Feuers die Lichterscheinung in Form offener Flammen gehört. Die "glühende Oxydation" bzw. Glut sei kein Feuer.

In der mehrere Jahre sehr intensiv geführten Diskussion ging es um die Frage, ob die in reinem Sauerstoff unter Druck, bzw. auch in schnell strömendem Sauerstoff mögliche Verbrennung von

kompaktem Eisen, die unter starker Wärmeentwicklung mit Lichtemission abläuft, als Feuer und ein daraus resultierender Schaden als Brand bezeichnet werden muß. Die Argumente von VOSSEN scheinen z.T. technisch durchaus einleuchtend zu sein. Indem er aber dafür plädierte, den Begriff Feuer nicht auf flammenlose Verbrennungsprozesse anzuwenden, ging er mit seinem Brandbegriff hinter bereits durch die Versicherungswissenschaft und -praxis fixierte Positionen zurück. Auf die anderen Punkte dieser Definition wird noch eingegangen.

WÄLDER (1971) dagegen betrachtet eine Verbrennung mit Lichterscheinung allgemein als Feuer und führt die Verbrennung auf den Oxidationsbegriff der Chemie zurück. Er unterscheidet zwischen Oxidation im engeren (konventionellen) Sinne, bei der sich ein Stoff mit Sauerstoff unter Bildung eines Oxids vereinigt, und dem von der modernen Chemie erweiterten Oxidationsbegriff. Darunter versteht man die Abgabe von Elektronen aus äußeren Elektronenschalen von Atomen chemischer Elemente an die äußeren Elektronenschalen der Atome anderer Elemente. Eine Reduktion ist die entsprechende Aufnahme von Elektronen. Auf diese Weise sind Oxidation und Reduktion als sog. Redoxreaktion zwangsläufig miteinander gekoppelt. Ein solcher Elektronenaustausch findet zwischen Stoffen, die leicht Elektronen aufnehmen, sog. Oxidationsmitteln (Fluor, Chlor, Sauerstoff, Schwefel usw.) und Stoffen die Elektronen abgeben, sog. Reduktionsmitteln (u.a. auch die meisten Metalle) statt.

Bei Anwendung dieses erweiterten Redoxbegriffes wären auch die durch Verbrennungsprozesse mit Feuererscheinungen ohne Beteiligung von Sauerstoff entstandenen Schäden in den Versicherungsschutz eingeschlossen, sofern auch die übrigen Merkmale des Brandbegriffs zutreffen. Dies gilt etwa für die sog. Chlor/Eisenbrände, d.h. bei Verbrennungsprozessen von Eisen in Chlor, die mit den typischen Feuererscheinungen vor sich gehen und bei denen Anlageteile zerstört werden können. Die chemischen Reaktionen bei Eisenbränden durch komprimierten Sauerstoff sind

sogar schon durch den konventionellen Oxidationsbegriff erfaßt.

Demgegenüber habe VOSSEN (nach WÄLDER) eine sogar gegenüber der herkömmlichen Vorstellung von Oxidation eingeschränkte Auffassung des Oxidationsbegriffs vertreten. Ein Feuer ist nach VOSSEN nur eine Verbrennung mit Luft, die einen Sauerstoffgehalt von ca. 21 Vol.-% besitzt.

Die von VOSSEN postulierte Exothermie der Reaktion sieht WÄLDER durch das von den AFB geforderte Kriterium des Versicherungsbegriffs "Ausbreitung aus eigener Kraft" als erfüllt an. Da hier zwei Merkmale miteinander konkurrierten, wäre der Formulierung der AFB Vorrang einzuräumen.

Beide Definitionen des Feuers können nicht voll befriedigen. WÄLDER setzt die doch sehr komplexen Prozesse einer Verbrennung und den chemischen Reaktionstyp "Oxidation" im wesentlichen gleich. Er begründet die Einführung der moderneren Redoxvorstellung anstelle des konventionellen Modells von der Oxidation in das Merkmal "FEUER" des Brandbegriffs mit der Interessenabwägung zwischen Versicherern und Versicherungsnehmern. Die Ausdehnung des Versicherungsschutzes bliebe innerhalb kontrollierbarer Grenzen.

Nach einem Urteil des OLG HAMBURG wird erneut diskutiert, ob es die Definition des Brandbegriffs in der AFB alter Formulierung zweifelsfrei erfordert, daß bei jedem Brand alle Merkmale des Brandbegriffs erfüllt sein müssen. Die Mehrheit der Kommentatoren vertritt die Auffassung (MARTIN, 1986; FALCKENBERG, 1973; HERDT, 1978), die auch in der gewählten Gliederung zum Ausdruck kommt (S. 6), daß neben einer der Alternativen - Entstehung außerhalb eines Herdes bzw. Verlassen des bestimmungsgemäßen Herdes - immer auch das Feuer zur Ausbreitung aus eigener Kraft fähig sein muß. MARTIN (1986) gibt aber bereits zu bedenken, daß dies "... freilich besser auch im Wortlaut hätte deutlich gemacht werden sollen".

WUSSOW (1975) interpretierte den früheren Brandbegriff anders: "Ein Schadenfeuer liegt in zwei Fällen vor: Einmal, wenn das Feuer ohne einen bestimmungsmäßigen Herd entstanden ist und zum andern, wenn es ihn verlassen hat und sich aus eigener Kraft auszubreiten vermag .." sowie: "Ein ohne bestimmungsmäßigen Herd entstandenes Feuer ist ohne weiters ein Schadenfeuer".

Die Zuordnung der Konjunktionen **oder** und **und** lassen tatsächlich beide Auslegungen zu. Diesen Standpunkt vertrat auch das OLG Hamburg in dem angesprochenen Rechtsstreit: "Ist ein Feuer ohne einen bestimmungsmäßigen Herd entstanden, so liegt nach der Unklarheitenregel des § 5 AGBG ein Schadenfeuer ... auch dann vor, wenn sich das Feuer nicht aus eigener Kraft auszubreiten vermag."

Durch Hinzufügen des Artikels **das** in der Neuformulierung des Brandbegriffs in den AFB 87 (... und das sich aus eigener Kraft ...) wird klargestellt, daß die Ausbreitungsfähigkeit Voraussetzung für beide Alternativen ist (VdS, 1987).

### **2.3 Brandbegriffe außerhalb der AFB**

Nachfolgend werden Definitionen des Begriffes **Brand** sowie die damit zusammenhängenden Begriffe **Verbrennung** und **Feuer** aus verschiedenen Bereichen, die professionell mit dem Schadenereignis Brand bzw. mit Maßnahmen des Brandschutzes befaßt sind, zusammengestellt. Auf diesem Hintergrund lassen sich verschiedene Aspekte des Brandbegriffes aus dem Versicherungswesen einfacher erläutern. Die Aufstellung stellt eine Auswahl dar und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

## 1) Versicherungswissenschaftliche Literatur

### STÖR (1909):

"Unter **Brand** ist ein entfesselttes Feuer zu verstehen, das entweder keinen bestimmungsgemäßen Herd hat oder in seiner Wirkung denselben überschreitet und Gegenstände ergreift, welche zum Verbrennen in dieser Weise nicht bestimmt sind"

### VON GIERKE (1912):

"**Brand** ist eine bestimmungswidrige Feuererscheinung, die sich außerhalb eines ordnungsgemäßen Herdes an Sachen vollzieht und sich selbständig an ihnen fortzuentwickeln vermag"

### HELMER (1930):

"**Brand** ist ein Schadenfeuer, das imstande ist, sich außerhalb eines Herdes aus eigener Kraft an einer Sache fortzuentwickeln"

Der AFB-Brandbegriff ist vor allem durch die Formulierungen von STÖR und von V. GIERKE stark beeinflusst worden. In den AFB wird darüber hinaus auf die Entstehung eines Brandes außerhalb eines bestimmungsgemäßen Herdes verwiesen.

## 2) Gerichtsurteile

### Landgericht Berlin (1910):

"... ein **Brand** im Sinne der Versicherungsbedingungen auch dann vorliege, wenn durch Feuer ein Versengen eines Gegenstandes entstehe."

### Landgericht Hamburg (1911):

"Im Gegenteil tritt im allgemeinen Sprachgebrauch ein Unterschied

bei der Anwendung der Worte **Feuer** und **Brand** in "quantitativer" \*) Beziehung hervor. Denn in der Regel pflegt man einen Verbrennungsprozeß als **Feuer** dann zu bezeichnen, wenn man die Licht- und Wärmeerscheinungen insbesondere das lebhaftes Flackern der Flamme bezeichnen will, während man mit der Bezeichnung **Brand** mehr die innere zersetzende und zerstörende Wirkung eines Verbrennungsprozesses zum Ausdrucke bringen möchte. Ein Blick in die deutschen Wörterbücher von Grimm und Heyne, die zahlreiche Beispiele über den Gebrauch der Worte **Feuer** und **Brand** im eigentlichen und übertragenen Sinne bringen, überzeugt, daß nach allgemeinem Sprachgebrauche die Größe und der Umfang eines Feuers für den Gebrauch der Worte **Feuer** und **Brand** ohne Bedeutung ist. Mit Recht hat daher auch die Begründung zum VVG sich der Ausdrücke **Feuer**, **Brand** und **Brandereignis** synonym bedient."

In dem diesem Urteil zu Grunde liegendem Prozeß wurde einem Mann Schadenersatz zugesprochen, dem eine Zigarette "ein Loch von der Größe einer Erbse" in die Hose gebrannt hatte. Obwohl das Urteil in der Folgezeit heftig kritisiert wurde, sind einige Gedanken darin enthalten, die bis heute wirksam sind, z.B. der Gebrauch der Begriffe **Feuer** und **Brand** unabhängig von der Größe des Ereignisses sowie die häufig zu bemerkende synonyme Verwendung der Begriffe **Feuer** und **Brand**.

**Reichsgericht Leipzig (1907):**

"Eine Begriffsbestimmung des Wortes **Brand** ist im Gesetz nicht gegeben; es unterliegt aber keinem Bedenken, darunter auf Grund der Materialien des Gesetzes und in Anlehnung an den allgemeinen Sprachgebrauch ein Brennen der Sache selbst, ein Ergriffensein derselben vom Feuer, und zwar derart, daß das Feuer ohne die Einwirkung neuen Zündstoffes sich fortzuentwickeln vermag, zu verstehen."

---

\*) Dies ist wohl ein sinnwidriger Schreibfehler im Urteil

Dieses Urteil stieß auf Vorbehalte, weil es im wesentlichen auf Gedanken des Strafrechts basiert, führte aber in das Versicherungsrecht den Gedanken ein, daß der Brand als gefährliches Feuer anzusehen ist.

### 3) Brandschutzliteratur

SCHEICHL (1958):

"Ein Brand ist ein freiwillig ablaufender stofflicher Umsatz, dessen wichtigster Teilvorgang, nämlich die Verbrennung der brennbaren Bestandteile des Brandobjekts, Energie, hauptsächlich in Form von Wärme und Licht, liefert."

KAUFHOLD (1975):

"Das Feuer ist die äußere sichtbare Begleiterscheinung einer Verbrennung."

SCHREIBER und PORST (1972):

"Feuer ist eine von Menschen gesteuerte und auf einen vorbestimmten Raum beschränkte Verbrennung."

"Brand ist eine von Menschen nicht gesteuerte und auf keinen vorbestimmten Raum beschränkte Verbrennung. Er kann entweder aus einem Feuer hervorgehen oder direkt durch Zündung entstehen".

In dieser Definition wird der Begriff Feuer ausschließlich unter dem Aspekt des Nutzfeuers betrachtet.

### 4) Normenwesen

DIN 14011, Teil 1: Begriffe aus dem Feuerwehrwesen - Physikalische und chemische Vorgänge (07.1977):

**"Brennen:**

Brennen ist eine mit Flamme und/oder Glut selbständig ablaufende exotherme Reaktion zwischen einem brennbaren Stoff und Sauerstoff oder Luft."

**"Feuer:**

Feuer umfaßt als Oberbegriff sowohl bestimmungsgemäßes Brennen (Nutzfeuer) als auch nichtbestimmungsgemäßes Brennen (Schadenfeuer).

Anmerkung: Bisher wurde unter dem Begriff **Feuer** nur die sichtbare Begleiterscheinung des Brennens in Form von Glut und/oder Flammen verstanden."

**"Brand:**

Brand ist ein nicht bestimmungsgemäßes Brennen, das sich unkontrolliert ausbreiten kann."

In den Erläuterungen zu DIN 14 011, Teil 1 wird ausdrücklich festgestellt, daß die Begriffsbestimmungen keinen Anspruch auf wissenschaftliche Exaktheit erheben und mehr feuerwehrpraktischen Bedürfnissen entsprechen.

**DIN 50060: Prüfung des Brandverhaltens von Werkstoffen und Erzeugnissen - Begriffe (08.1985):**

In dieser vom Normenausschuß Materialprüfung aufgestellten Norm sind die Begriffe in alphabetischer Reihenfolge geordnet und parallel auch in englischer und französischer Sprache angegeben. Die Begriffsliste soll später in die internationale Norm ISO 3262 "Fire tests - Vocabulary" übernommen werden.

**"Verbrennung:**

Exotherme Reaktion eines Stoffes in Verbindung mit Flammen und/oder Glimmen und gegebenenfalls Rauch."

Englisch:

"Exothermic Reaction of a combustible substance with an oxidizer, accompanied by flames and/or glowing and possibly emission of smoke."

"Feuer:

Verbrennungsvorgang, gekennzeichnet durch die Freisetzung von Wärme, begleitet von Flammen und/oder Glimmen und gegebenenfalls von Rauch.

Anmerkung: Der Begriff "Feuer" umfaßt als Oberbegriff sowohl bestimmungsgemäßes Brennen (Nutzfeuer) als auch nicht bestimmungsfähiges Brennen (Schadenfeuer)."

Englisch:

"A process of combustion characterized by the emission of heat accompanied by flame and/or glowing combustion and possibly by smoke."

"Brand:

Nicht bestimmungsgemäßes Brennen, das sich unkontrolliert ausbreiten kann."

Englisch:

"Combustion spreading uncontrolled in time and space."

Zu beachten ist die Differenzierung der Begriffe **Verbrennung** und **Feuer** in dieser Norm. Auffallend ist ferner, daß die Definitionen in der Begriffsliste in den verschiedenen Sprachen auch sinngemäß etwas voneinander abweichen können. Das gilt nicht nur für die Begriffe **Brand** und **Feuer**, für die es im Englischen nur einen Begriff **fire** gibt, sondern auch für andere Begriffsbestimmungen. Die englische Definition **fire** (für "Brand") besticht durch ihre Prägnanz und Kürze.

Auffallend sind die Differenzen zwischen den Definitionen **Brennen** in DIN 14011 und **Verbrennung** in DIN 50060. Während die Norm aus dem Materialprüfungswesen eine sehr allgemeine Definition der Verbrennung bietet, hat man sich im Feuerwehrwesen (immerhin noch im Jahr 1977!) auf eine sehr eingeschränkte und damit eigentlich überholte Begriffsbestimmung für "Brennen" geeinigt.

Allgemein wird im technisch-wissenschaftlichen Sprachgebrauch die Formulierung **unkontrollierte Ausbreitung** als charakteristisches Merkmal des Brandes bevorzugt. Demgegenüber verzichtet man auf den Begriff **Herd**, um einen Ort bzw. einen räumlich eingegrenzten Bereich zu bestimmen sowie auf das Merkmal **Ausbreitung aus eigener Kraft**.

An porösen Festkörpern sind auch flammenlose Verbrennungsprozesse möglich. Als sog. **Schwel- oder Glimmbrände** haben diese Vorgänge begrifflich eine besondere Bedeutung im Rahmen der Untersuchung. Es soll hier zunächst nur auf die unterschiedliche Verwendung der Begriffsbestimmungen im Normenwesen und in der Literatur hingewiesen werden.

Nach DIN 50060 (08.1985) versteht man unter **Schwelen** "eine langsame oxidative Reaktion eines Materials ohne Leuchterscheinung, im allgemeinen durch Rauch und Temperaturanstieg gekennzeichnet". In der dazugehörigen englischen Definition heißt es: "The slow **combustion** of a material without light ..." und wird mit dem Terminus **smouldering combustion**, manchmal auch nur **smouldering** benannt. In der Literatur wird dieser Vorgang ebenfalls häufig als "langsame Verbrennung eines Stoffes ohne Lichterscheinung ..." bezeichnet (Troitzsch, 1982; Hölemann, 1984). Die Meinungen, ob oxidative Schwelprozesse unter den Begriff **Verbrennung** fallen, sind also durchaus nicht einheitlich.

Nicht umstritten ist, daß es sich beim Glimmen um die Verbrennung eines Materials in festem Zustand ohne Flammen handelt, bei der Licht von der Verbrennungszone ausgestrahlt wird. Nachglimmen wird definiert als "fortdauerndes Glimmen eines Materials nach Erlöschen der Flamme oder nach Entfernen der Zündquelle". Auch das Glimmen wird in der englischsprachigen Literatur häufig vom Begriff *smouldering combustion* miterfaßt.

### 3 Formen der Verbrennung

Eine Verbrennung kann in fester, flüssiger und gasförmiger Phase stattfinden. Da für den Begriff des Feuers im Versicherungswesen vor allem Verbrennungsvorgänge in fester Phase sowie im Gasraum interessant sind, sollen diese Formen der Verbrennung vorrangig besprochen werden.

#### 3.1 Verbrennung in Flammen

Verbrennungsvorgänge im Gasraum \*) bezeichnet man als **Flammen**, die sich nach verschiedenen, z.T. schon äußerlich sichtbaren Kriterien einteilen lassen.

Man unterscheidet die Flammen nach Mischungsbedingungen von Brennstoff und Oxidationsmittel, Strömungsverhältnissen in der Flamme und Aggregatzustand des Brennstoffs (FRISTRÖM/WESTENBERG, 1965).

##### 3.1.1 Mischungsbedingungen

###### a) Diffusionsflammen

Das einfachste Vorbild einer Diffusionsflamme ist die Kerzenflamme (Bild 1). In Bild 2 ist diese Flamme im Schnitt schematisch mit ihrer Temperaturverteilung dargestellt. Der Brennstoff (Paraffin oder Wachs) wird durch die Flammenwärme, die hier im wesentlichen durch die Strahlung der Flamme übertragen wird,

---

\*) Hier wird bewußt der etwas eingeschränktere Begriff **Gasphase** vermieden, denn dabei handelt es sich um einen einheitlichen Aggregatzustand. In Flammen, vor allem in Brandflammen, treten aber Flüssigkeitströpfchen und feste Partikel auf, so daß keine homogene Gasphase vorliegt.

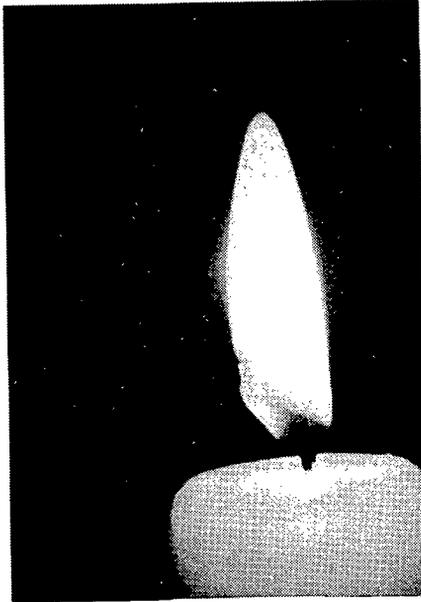
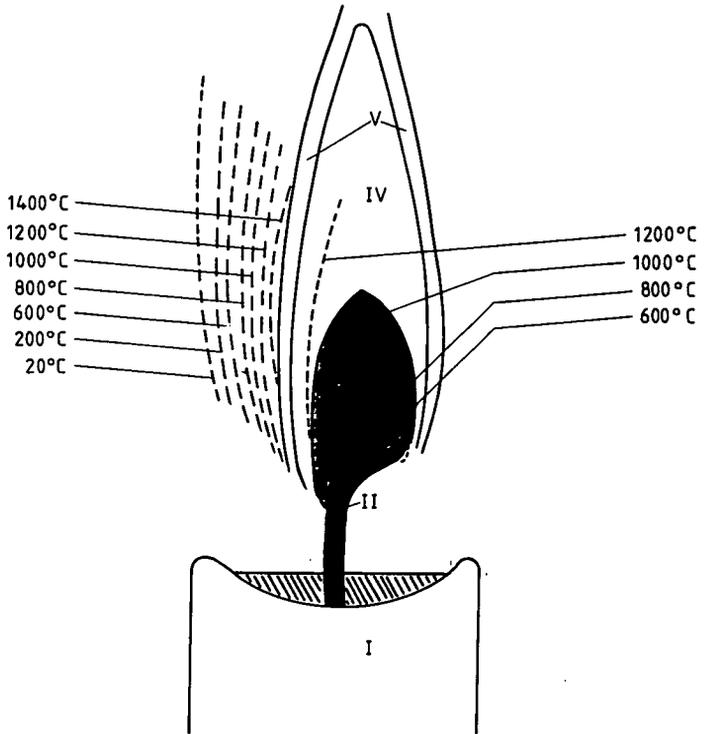


Bild 1: Laminare Diffusionsflamme einer Kerze  
(Foto BERGHÖFER, 1985)



- I : Kerze (Paraffin bzw. Wachs)
- II : Docht
- III : dunkle Zone
- IV : leuchtende Zone
- V : Hauptreaktionszone

Temperaturmessung mit Thermoelementen

Bild 2: Kerzenflamme mit Temperaturprofil, schematisch  
(nach GAYDON/WOLFHARD)

geschmolzen, durch Kapillarkräfte im Docht gegen die Schwerkraft nach oben transportiert und vom Docht verdampft. In der inneren dunklen Flammenzone werden die Brennstoffmoleküle thermisch gespalten (pyrolysiert). Bei diesem chemischen Abbau<sup>\*)</sup>, der zu immer kleineren Molekülbruchstücken führt, je weiter der Brennstoff in heißere Zonen nach außen gelangt, entsteht auch Kohlenstoff, der sich zu allerdings mikroskopisch kleinen Partikeln zusammenlagert (Durchmesser größenordnungsmäßig  $\lesssim 0,1 \mu\text{m}$ ). Bei den nun schon erreichten Temperaturen von über  $1000^\circ\text{C}$  fangen die kleinen Kohlenstoffpartikel an zu glühen und verursachen dadurch das charakteristische Leuchten der Flamme. In dem äußeren, kaum noch sichtbaren Flammensaum werden bei noch höherer Temperatur die Kohlenstoffpartikel einschließlich der anderen gasförmigen Abbauprodukte durch den von außen mit der Luft in die Flamme einströmenden Sauerstoff vollständig verbrannt.

In einer Kerzenflamme mischen sich Brennstoff und Luft erst in der Flammenzone; Sauerstoffmoleküle und Brennstoffteilchen gelangen durch Diffusion zueinander. Die Verbrennungsgeschwindigkeit dieser einfachen Diffusionsflammen ohne äußere Störungen ist gering und beträgt nur einige cm/sec. Sie hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der Brennstoff und Sauerstoff in die Flammenzone wandern, wird aber auch durch äußere Bedingungen, z.B. einen Luftzug, stark beeinflusst.

Bei den Flammen eines Brandes handelt es sich in den meisten Fällen um Diffusionsflammen; im Vergleich zu Kerzenflammen sind jedoch eine Reihe von zusätzlichen Effekten zu berücksichtigen.

---

\*) Die chemischen Reaktionen bei Verbrennungsvorgängen werden ausführlicher in Abschnitt 4 erläutert.

## b) Vormischflammen

Vorbild dieses Flammentyps ist die Bunsenbrenner- oder auch die Schweißbrennerflamme. Hier werden Brennstoff und Oxidationsmittel (Luft oder Sauerstoff) bereits im Brennerrohr vor Eintritt in die Flamme gemischt, strömen also gemeinsam in die Flammenfront. Bild 3 zeigt eine Bunsenbrennerflamme, in der ein Erdgas/Luft-Gemisch (bzw. Methan/Luft-Gemisch) mit dem typischen hellblauen Flammenkegel verbrennt, der die primäre Reaktionszone darstellt (daher auch Primärflammenkegel genannt).

In der sehr dünnen Schicht dieser Flammenzone reagiert der Brennstoff direkt mit Sauerstoff (Dicke der Reaktionszone größenordnungsmäßig  $\lesssim 1$  mm). Ruß wird in dieser Flamme nicht gebildet, wenn die Mischung der zugeführten Gase keinen Brennstoffüberschuß enthält. In der Primärflamme können die Verbrennungsreaktionen wegen der Lage der chemischen Gleichgewichte bei den hohen Flammentemperaturen (diese Frage wird hier nicht weiter diskutiert) nicht vollständig bis zu den Endprodukten Kohlendioxid und Wasserdampf geführt werden. Die diese Reaktionsschicht verlassenden instabilen Zwischenprodukte verbrennen erst in einer die Primärflamme umgebenden Diffusionsflamme (auch als Hüllflamme, Beiflamme, Sekundärflamme bezeichnet) zu den genannten stabilen Endprodukten. Bild 4 zeigt nochmals ein Schema einer solchen Verbrennung.

Die Flammgeschwindigkeit ergibt sich aus der Geschwindigkeit, mit der die Flamme dem durch den Kegelmantel strömenden Gemisch entgegenbrennt. Aus der Strömungsgeschwindigkeit des Gemisches im Brennerrohr und dem Winkel an der Kegelspitze läßt sich diese sog. laminare Flammgeschwindigkeit ausmessen und berechnen. In Bild 5 ist das Prinzip dargestellt. Die laminare Flammgeschwindigkeit von Vormischflammen ist auch direkt als chemische Reaktionsgeschwindigkeit der Flammenreaktion interpretierbar, denn durch die Vormischung von Brennstoff und Oxidationsmittel braudie kleinsten Teilchen in der Flamme nicht mehr zueinander wan-

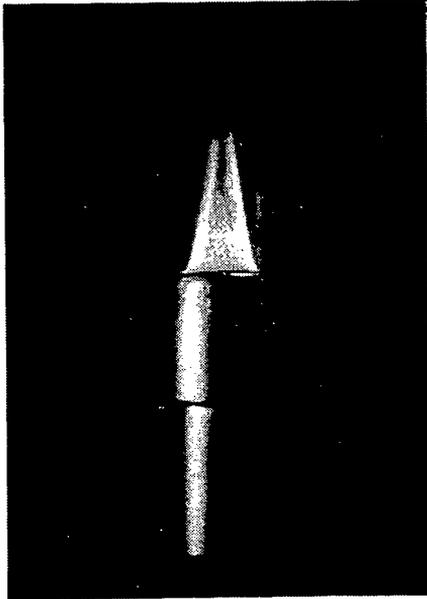


Bild 3: Laminare Vormischflamme eines Bunsenbrenners  
(Foto HÖLEMANN, 1984)

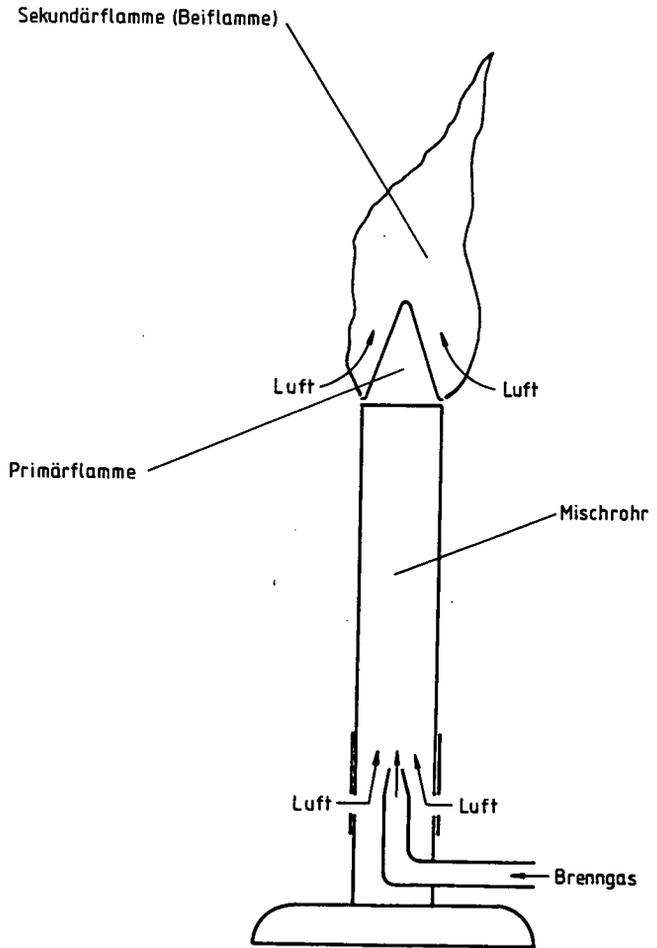
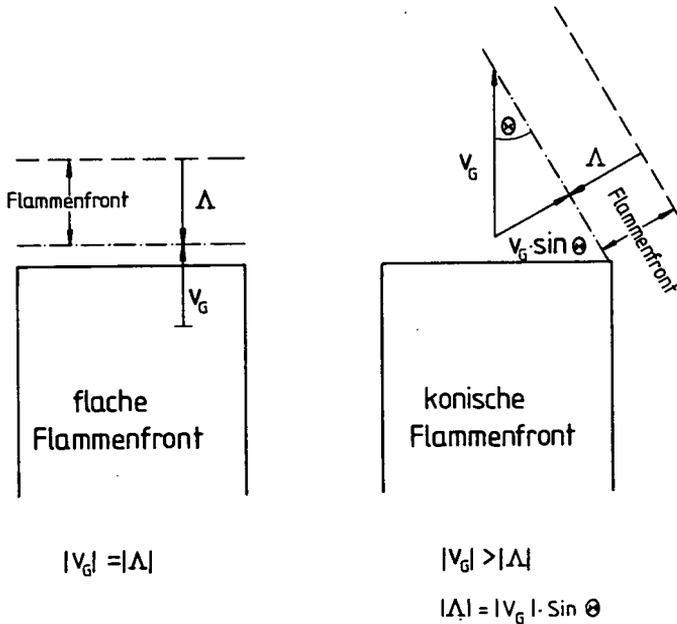


Bild 4: Bunsenbrennerflamme, schematisch



- beginnender Temperaturanstieg
- - - - - beendete Verbrennung
- $\Delta$  laminare Verbrennungsgeschwindigkeit
- $v_G$  Geschwindigkeit des ausströmenden Gases
- $\Theta$  Winkel an der Spitze des Flammenkegels

Bild 5: Bestimmung der laminaren Flammgeschwindigkeit von Vormischflammen, schematisch (nach FRISTROM/WESTENBERG)

dern, sondern haben bereits den für die Reaktion günstigsten Abstand.

Auch die Temperatur in der Primärflammenzone läßt sich experimentell und rechnerisch bestimmen. Die Bilder 6 und 7 zeigen Beispiele für Geschwindigkeiten und Temperaturen von Vormischflammen verschiedener Brenngas/Luft-Gemische in Abhängigkeit von den Mischungsverhältnissen. Insgesamt liegen diese Temperaturen und Geschwindigkeiten deutlich über denen einfacher Diffusionsflammen (siehe Bild 2).

Eine Vormischflamme kann bei einem Brand in Form einer Stichflamme oder Verpuffung auftreten, wenn eine Flamme in ein - z.B. durch Schwelprozesse - bereits gebildetes Brennstoff/Luft-Gemisch hineinzündet. Im allgemeinen sind aber Vormischflammen typisch für die Ausbreitung der Verbrennung in sog. Raumexplosionen.

### 3.1.2 Strömung in Flammen

#### a) laminare Flammen

Verläuft die Verbrennung in der Flamme in einer ruhigen ungestörten Strömung, so bezeichnet man die Strömung als laminar. Man sagt auch, die - allerdings gedachten - Stromfäden laufen ungestört nebeneinander. Die Quervermischung zwischen den Stromfäden ist i.w. nur durch molekulare Eigenbewegung möglich. Ruhig brennende Kerzen- oder Bunsenbrennerflammen sind laminar.

#### b) turbulente Flammen

Bilden sich Wirbel in der Flamme durch die Beschleunigung der Strömung bei der Verbrennung bzw. werden Brennstoff und Luft bereits in einer verwirbelten Strömung in die Flamme transportiert, so verläuft die Verbrennung turbulent. Die molekularen Eigenbewegungen der kleinsten Teilchen in der Flamme werden

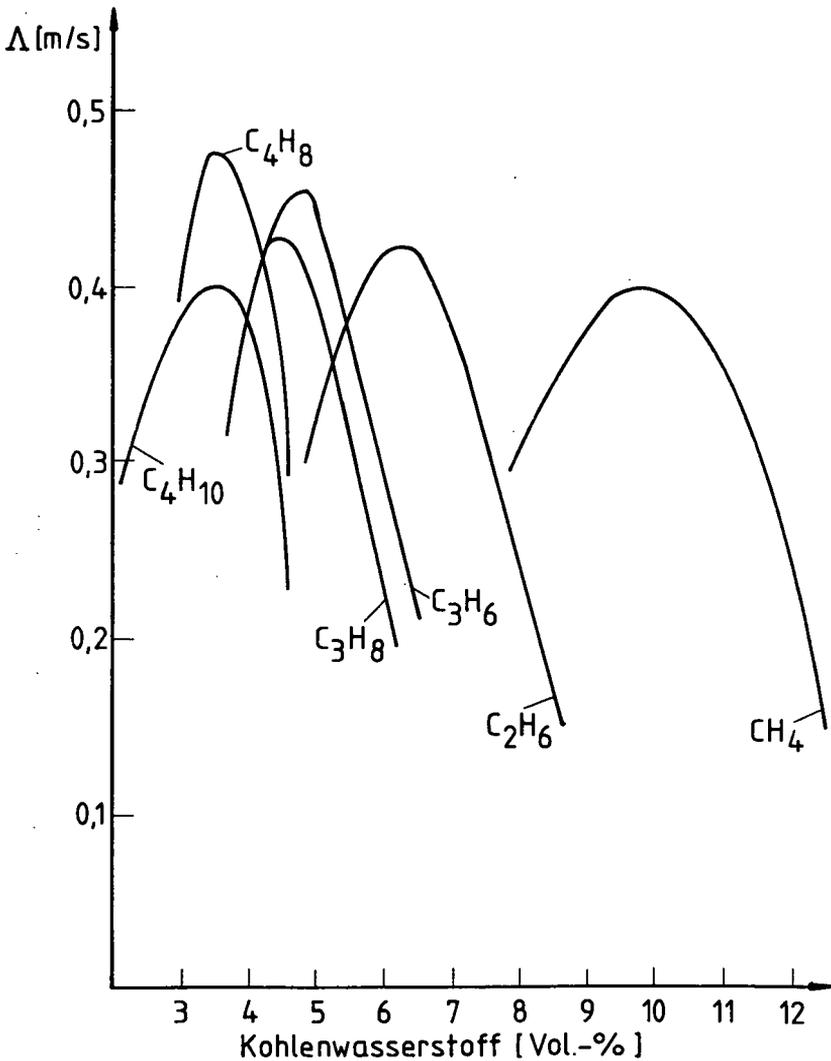


Bild 6: Laminare Flammengeschwindigkeiten vorgemischter Kohlenwasserstoff/Luft-Flammen (nach SCHOLTE/VAAGS)

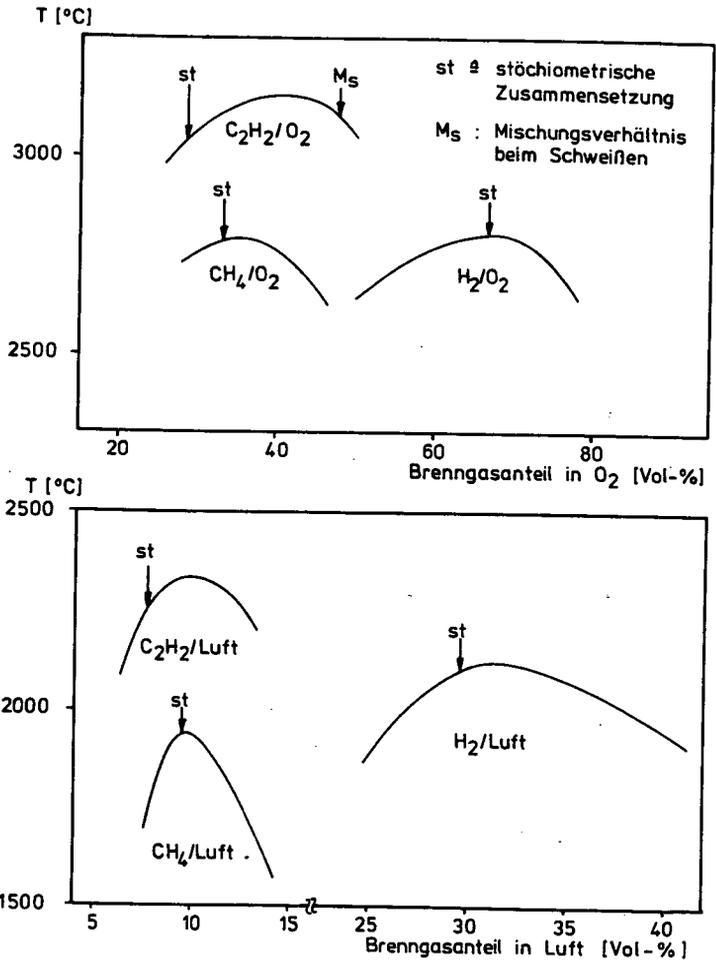


Bild 7: Maximale Flammentemperaturen vorgemischter Brenngas/-Sauerstoff- und Brenngas/Luft-Flammen im Primärflammenkegel (Daten nach LANDOLT/BÖRNSTEIN)

durch makroskopische Bewegungs- und Transportvorgänge überlagert, wobei mehr oder weniger definierte kurzlebige Flammenbezirke - man spricht auch von Flammenballen - nach Richtung und Betrag sehr verschiedene Geschwindigkeiten besitzen.

Der Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömung ist von der dimensionslosen Reynoldszahl  $R_e$  abhängig, die sich nach folgender Beziehung bestimmen läßt:

$$R_e = \frac{v \cdot d \cdot \xi}{\eta} \quad (3.1)$$

- v: Geschwindigkeit der Strömung in m/s ;
- d: Durchmesser der Strömung, z.B. in einem Rohr oder in einem Brand in m ;
- $\eta$ : dynamische Zähigkeit des strömenden Mediums, hier: der Flammengase in  $\frac{kg}{(m \cdot s)}$  ;
- $\xi$ : Dichte in  $kg/m^3$  ;

In der Literatur findet man Werte für die Reynoldszahl von 1500 bis etwa 2800, bei denen ein Übergang von einer laminaren in eine turbulente Strömung erfolgen kann (Lehrbücher der Physik; FRISTROM/WESTENBERG, 1965; GÜNTHER, 1977). Die zusätzliche Mischung durch Turbulenz kann die Verbrennungsgeschwindigkeit enorm steigern (Bild 8). In der Flamme eines Ölbrenners herrschen z.B. starke Turbulenzen, wobei die Öltröpfchen der Flamme bereits in einer sehr turbulenten Strömung zugeführt werden.

Die Flammen eines Brandes sind in den meisten Fällen ebenfalls turbulente Diffusionsflammen. Die Verwirbelung erfolgt hier meist in großen Ballen. In Bild 9 erkennt man bereits Anfänge einer schwachen Turbulenz in der Flamme. Die Bilder 10 (explodierendes Gasfeuerzeug) und 11 (rasch abflammende Methanwolke) zeigen stark turbulente Diffusionsflammen.

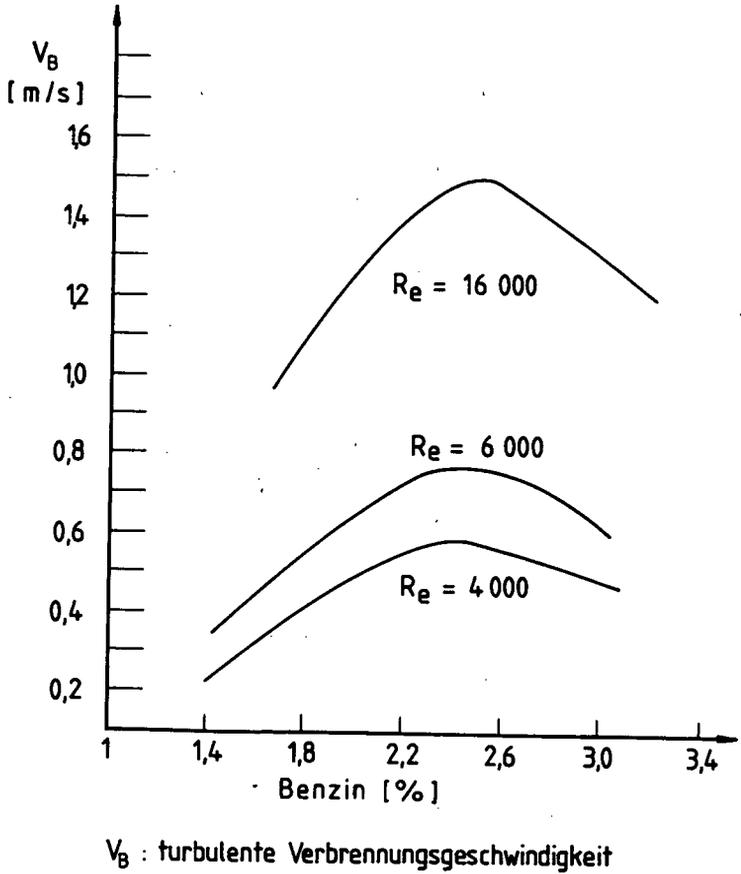
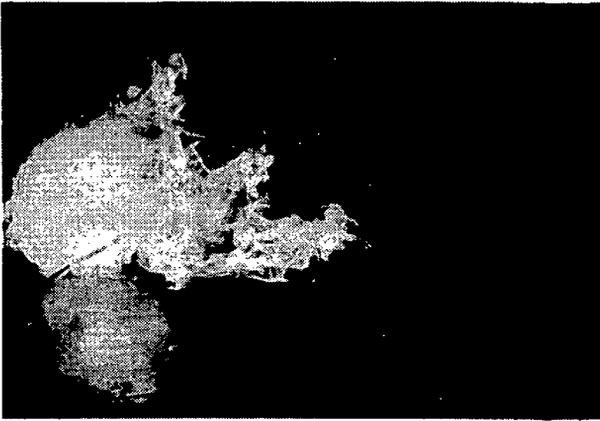


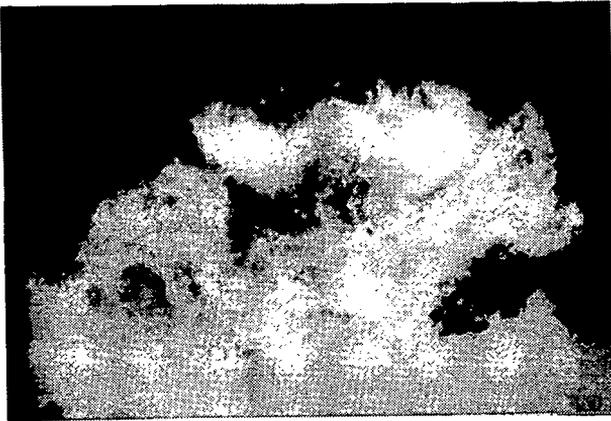
Bild 8: Steigerung der Verbrennungsgeschwindigkeit von Benzin/-Luft-Flammen mit zunehmender Turbulenz (nach GOLDENBERG/PELEVIN)



**Bild 9:** Diffusionsflammen mit schwacher Turbulenz  
(Foto BERGHÖFER, 1985)



**Bild 10:** Stark turbulente Butanflamme aus einem zerknallenden Einweg-Gasfeuerzeug  
(Foto RONKEN, 1983)



**Bild 11: Starke Turbulenz in einer abflammenden Methanwolke  
(Foto HÖLEMANN, 1982)**

### 3.1.3 Aggregatzustand des brennbaren Stoffs

#### a) Brennbare Gase

Die Verbrennung von Gasen erfolgt immer in Flammenform. Für die Vorgänge in Gasflammen gelten die bereits gegebenen Erläuterungen.

#### b) Brennbare Flüssigkeiten

Die Verbrennung brennbarer Flüssigkeiten läuft im allgemeinen in der Gasphase ab. Der Flammenreaktion ist also eine Verdampfung vorgeschaltet. Durch die Energie der Flamme muß zunächst die Verdampfungswärme der Flüssigkeit aufgebracht werden.

Die Verbrennungerscheinungen werden damit auch durch die Art der Verdampfung beeinflusst, etwa, ob die Flüssigkeit aus einer geschlossenen Flüssigkeitsoberfläche verdampft (aus einem Behälter oder Tank), ob kleine versprühte Tröpfchen vorliegen, die schnell verdampfen und damit auch schnell verbrennen können oder ob die Flüssigkeit sich auf Trägermaterialien (z.B. Textilien) befindet. Im letzteren Fall kann durch Kapillarkräfte laufend Brennstoff in die Flamme transportiert werden (Dochtwirkung; siehe Kerzenflamme).

Je nach betrachtetem Phänomen sind also verschiedene Geschwindigkeiten für den Ablauf des Verbrennungsprozesses maßgeblich:

1. die laminare oder turbulente Flammengeschwindigkeit;
2. die Geschwindigkeit, mit der sich eine Flamme auf einer Flüssigkeitsoberfläche ausbreitet, etwa auf einer Lache;
3. die Geschwindigkeit, mit der eine bestimmte Flüssigkeitsmenge verbrennt, die auch als Massenabbrandgeschwindigkeit bezeichnet wird. (Dies gilt sinngemäß auch für die Flammenbrände an Feststoffen.)

### **c) Feste brennbare Stoffe**

Feste Stoffe können **direkt** in Flammen nur in Staubform verbrannt werden. In den Flammen an einem festen Stoff verbrennen meist seine gasförmigen Zersetzungsprodukte (Pyrolyseprodukte) oder die aus dem geschmolzenen und anschließend verdampften Material gebildeten Gase (siehe Kerzenverbrennung).

Die Verbrennung eines Staubes in einer Flamme setzt noch einen vorgeschalteten mechanischen Vorgang voraus, eine Aufwirbelung bzw. das Einblasen des Staubes in eine Flamme. In aufgewirbelten Stäuben können die gefürchteten Staubexplosionen entstehen.

Bei der Verbrennung der Staubteilchen in der Flamme vollziehen sich die gleichen Vorgänge - aber mit sehr viel größerer Geschwindigkeit - wie an kompakten Festkörpern.

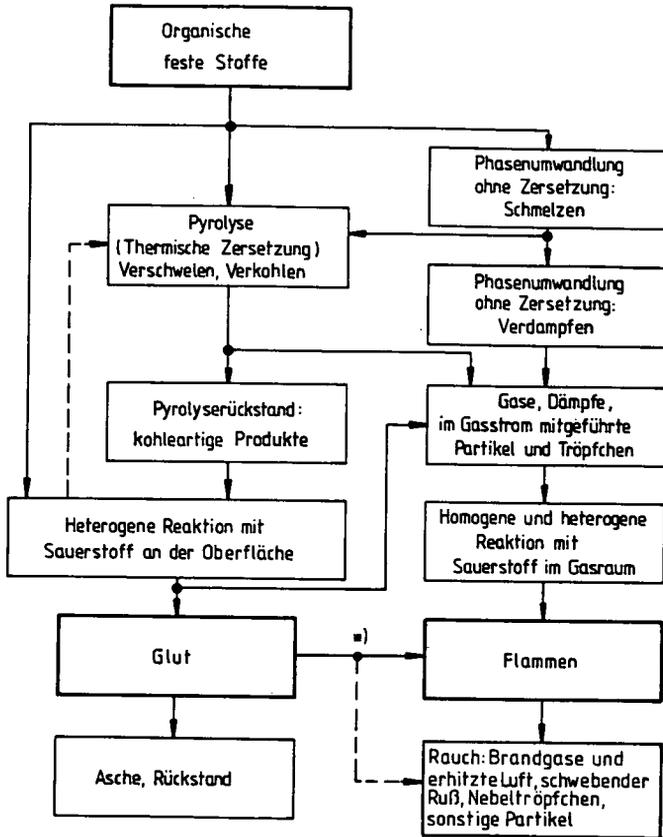
### **3.2 Verbrennung kompakter fester Stoffe**

#### **a) Verbrennung in Flammen und Glut**

Die Möglichkeiten, wie feste Materialien verbrennen können, sind vereinfacht in dem Schema in Bild 12 zusammengestellt. Hier sind zunächst kohlenstoffhaltige organische Stoffe berücksichtigt, d.h. Kohle, Holz, Kunststoffe usw..

Der einfachste Pfad - Schmelzen und Verdampfen eines Stoffes - wurde bereits hinreichend erläutert. Häufig zersetzen sich feste Werkstoffe, z.B. Holz, unter der Einwirkung von Wärme und bilden brennbare Gase und kohleartige feste Rückstände. Diese Art von thermischer Zersetzung, die auch unter Luftabschluß erfolgen kann, bezeichnet man als **Pyrolyse**. Die gebildeten Gase können in der bereits beschriebenen Weise in Flammen verbrennen.

Die verkohlten Rückstände nach einer Pyrolyse (etwa Holzkohle)



Anmerkung:

Dieses Schema stellt den unterschiedlichen Ablauf der Verbrennung organischer fester Stoffe bei einem Brand in vereinfachter Form dar. In abgewandelter Form kann das Schema auch auf Schmel- und Glimmbrände übertragen werden.

\*) i.w. CO-Verbrennung zu CO<sub>2</sub>

Bild 12: Verbrennung organischer Stoffe, vereinfachtes Schema

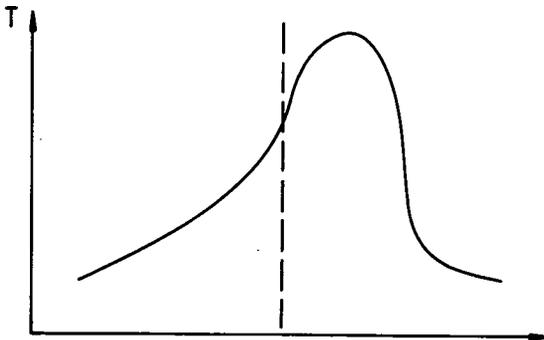
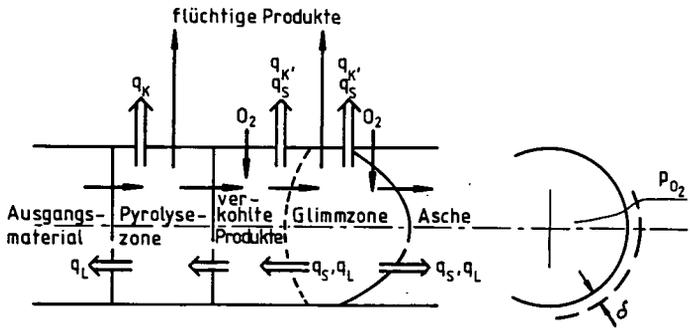
besitzen häufig eine poröse Struktur, Mikroporen, in die Luft bzw. Sauerstoff hineindiffundiert. Durch die Flammenwärme und die chemische Reaktionswärme, die bei der Reaktion von Sauerstoff mit Kohlenstoff frei wird, erhitzt sich die Kohle und fängt an zu glühen. Bei den hohen Gluttemperaturen entsteht an der Oberfläche des Kohlenstoffs zunächst Kohlenmonoxid, das anschließend in blauen Flämmchen zu Kohlendioxid verbrennt, die man über brennender Kohle gut beobachten kann. Die Verbrennung erfolgt also hier in Flammen und an der Oberfläche der Kohle, an der Glut.

Aus manchen Festkörpern entstehen bei der Pyrolyse keine porösen kohleartigen Rückstände, sondern teerartige Produkte, insbesondere aus vielen Kunststoffen, die in geeigneter Weise präpariert wurden. Haben die Pyrolyserückstände keine mikroporöse Struktur, so ist die Oberfläche für die Reaktion mit Sauerstoff nicht groß genug; eine Glutverbrennung oder ein Glimmen ist nicht möglich.

#### **b) Verbrennung durch Schwelen und Glimmen**

Glimm- oder Schwelprozesse sind in Ablagerungen brennbarer Stäube, in Schüttgütern, verschiedenen Naturprodukten, Textilien, Schaumkunststoffen und allgemein in Räumen mit eingeschränkter Ventilation, in Dämmschichten, Wänden oder Dehnfugen sowie in Zwischendeckenbereichen möglich. Auch der klassische Bau- und Werkstoff Holz ist unter bestimmten Bedingungen glimmfähig. Im eigenen Arbeitskreis wurden in den letzten Jahren Untersuchungen über Schwel- und Glimmbrände an Baustoffen sowie über die Zündung und Ausbreitung von Glimmprozessen an Probekörpern aus Cellulose durchgeführt (KOHLHAAS, 1982; HÖLEMANN 1984; EICHENBERG, 1984; HÖLEMANN et al, 1987).

Kombinierte Schwel- und Glimmvorgänge lassen sich vereinfacht am eindimensional abbrennenden (oder abreagierenden) Stab erläutern, wie es in der schematischen Einteilung des Reaktionsverlaufes in Zonen in Bild 13 zu erkennen ist (siehe auch MOUSSA et



⇒ Wärmtransport durch Strahlung  $q_S$ , Konvektion  $q_K$ , Wärmeleitung  $q_L$

→ Stofftransport

$p_{O_2}$  : Sauerstoffpartialdruck

$\delta$  : Dicke der (hypothetischen) Grenzschicht

Bild 13: Stoff- und Wärmtransport sowie Temperaturverlauf an einem glimmenden Stab

al, 1977). Dieses Modell ist praktisch in jeder glimmenden Zigarette realisiert.

#### In der Pyrolysezone

zersetzt sich das Material, und es bilden sich flüchtige, feste und z.T. flüssige Verbrennungsprodukte. Die flüchtigen Pyrolyseprodukte entzünden sich nicht, weil entweder die Pyrolysegaskonzentration nicht innerhalb des Zündbereiches liegt (siehe Abschnitt 6.2) oder die erforderliche Zündenergie nicht auf das brennbare Gas/Luft-Gemisch übertragen werden kann.

#### In der Glimmzone

verbrennen die kohleartigen Pyrolyseprodukte ggfs. unter Glimmerscheinungen. Wie bereits beschrieben, kann sich ein Glimmvorgang nur anschließen, wenn die festen Zersetzungsprodukte eine genügend poröse Struktur besitzen.

#### Der Rückstand

besteht aus festen Verbrennungsprodukten (Asche) oder nicht verbrannten Pyrolyseprodukten und nicht verbranntem Kohlenstoff.

Die experimentellen Untersuchungen über Schwel- und Glimmbrände wurden u.a. mit Stäben aus Cellulose bzw. Zellstoff durchgeführt und dabei vor allem die Sauerstoffkonzentration variiert. Bild 14 zeigt, daß unter den gewählten Versuchsbedingungen das selbständige Fortschreiten der Reaktionsfront bei einer Umgebungstemperatur von 125 °C und bei einer sehr geringen Strömungsgeschwindigkeit der Atmosphäre erst bei einem Sauerstoffgehalt von ca. 10 Vol.-% zum Stillstand kam. Die Temperaturen erreichten bei dieser Sauerstoffkonzentration knapp über 600 °C.

Man kann davon ausgehen, daß bei Schwelprozessen im Inneren von Körpern der Sauerstoffgehalt ebenfalls zurückgeht, daß sie aber trotzdem noch weiterschwelen.

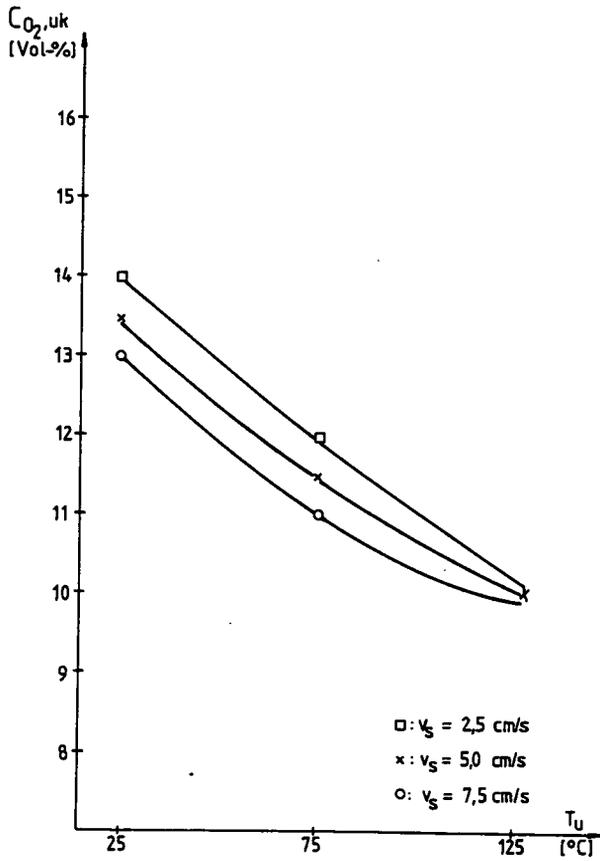


Bild 14: Untere kritische Sauerstoffkonzentration, bei der sich ein Schwelprozeß an einem horizontalen Cellulosestab gerade noch ausbreitet

Cellulose kann aber auch in Atmosphären mit stark erhöhter Sauerstoffkonzentration glimmen. Bild 15 zeigt Versuche, bei denen sich in 40%igem Sauerstoff an den Stäben ruhig brennende Glimmfronten entwickelten. Bei noch höherer Sauerstoffkonzentration erfolgte jedoch eine spontane, sehr schnelle Entflammung.

Die Geschwindigkeiten, mit denen solche Reaktionsfronten in Materialien weiterwandern bzw. sich ausbreiten, sind außerordentlich gering. Die kleinsten Geschwindigkeiten, die an den Cellulosestäben gemessen wurden, betragen ca. 1,5 mm/min. Bei Glimmversuchen an Baustoffen (hier wieder mit einem Sauerstoffgehalt der Atmosphäre von 20,8 Vol-%) wurden teilweise mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeiten von nur 0,5 mm/min (Bild 16) gefunden.

Auch die Geschwindigkeit, mit der die Temperatur an einer Stelle im Material ansteigt, ist extrem klein. In Bild 17 ist dargestellt, daß es bei Zündversuchen an kubischen Körpern aus Zellstoff (Kantenlänge 10 cm) an verschiedenen Meßstellen, jeweils bezogen auf das Temperaturmaximum und beginnend bei Raumtemperatur bis zu zwei Stunden dauerte, ehe der höchste Wert bei etwa 600 °C erreicht war. Im strömenden Gasgemisch einer vorge-mischten Flamme dauert es dagegen nur etwa 1 msec (oder weniger), bis das Gasgemisch auf seine Maximaltemperatur erhitzt wird. Schon von der glimmenden Zigarette weiß man, daß noch außerordentlich kleine Glimmnester selbständig weiterwandern. Bild 18 zeigt die Dicke der Reaktionsschicht in den Zellstoffstäben vom Beginn der Pyrolyse bis zum Temperaturabfall in der Ascheschicht in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration.

Diese Erkenntnisse sind ohne weiters auf reale Brände übertragbar. Kleinste Schwel- oder Glimmnester können bei niedrigen Sauerstoffkonzentrationen in porösen Materialien mit z.T. sehr geringen Geschwindigkeiten fortschreiten und auf diese Weise für die selbständige Ausbreitung eines Brandes sorgen.

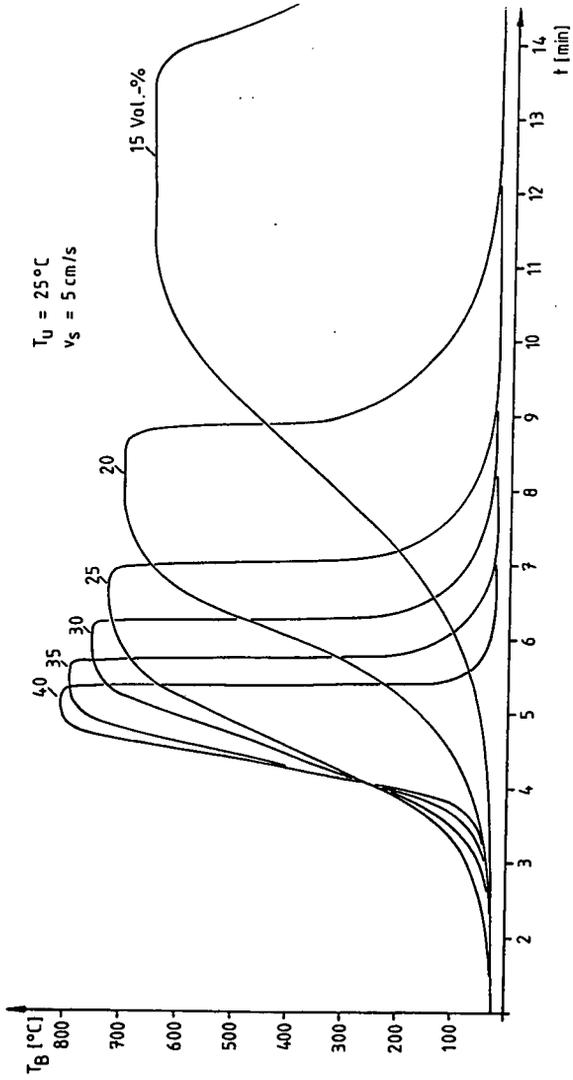
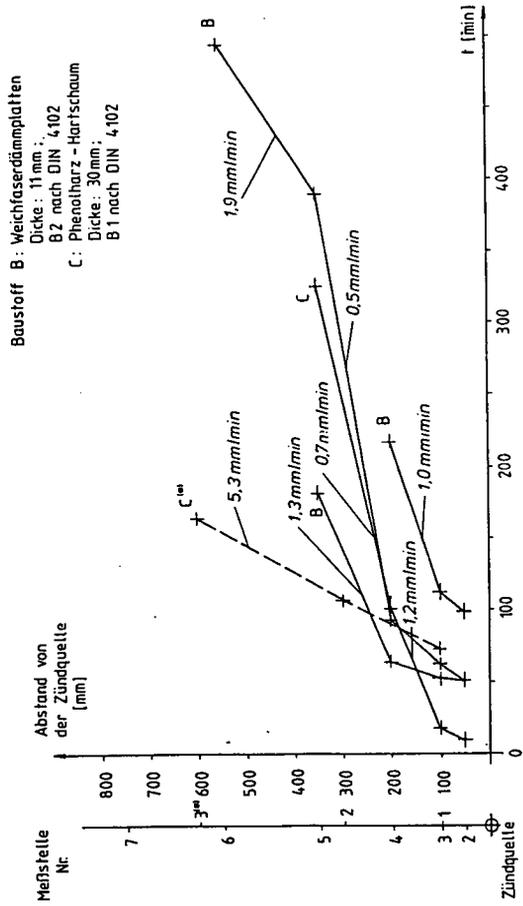


Bild 15: Temperatur/Zeitverlauf in glimmenden Zellstoffstäben



<sup>100</sup> Vorversuche

**Bild 16:** Geschwindigkeiten der Ausbreitung von Glimmfronten in Dämmstoffen

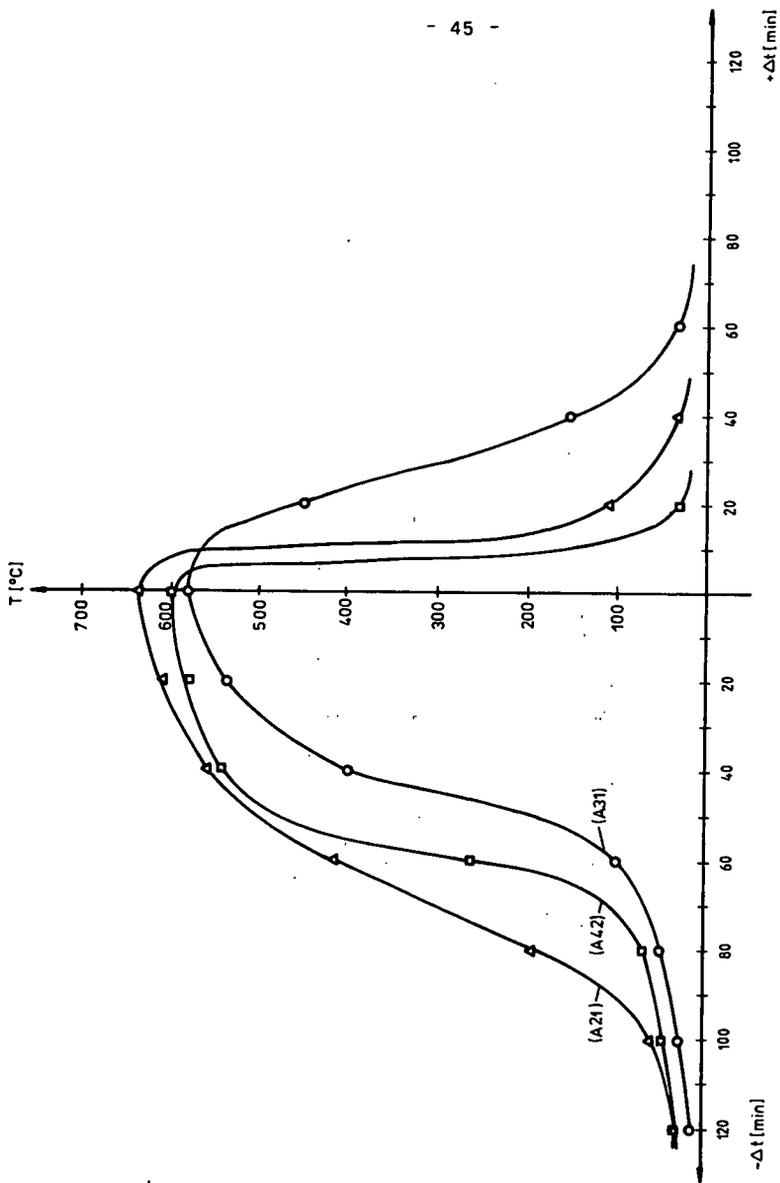


Bild 17: Zeitlicher Temperaturanstieg in einer Zellstoffprobe nach Zündung durch ein glühendes Teilchen an verschiedenen Meßstellen

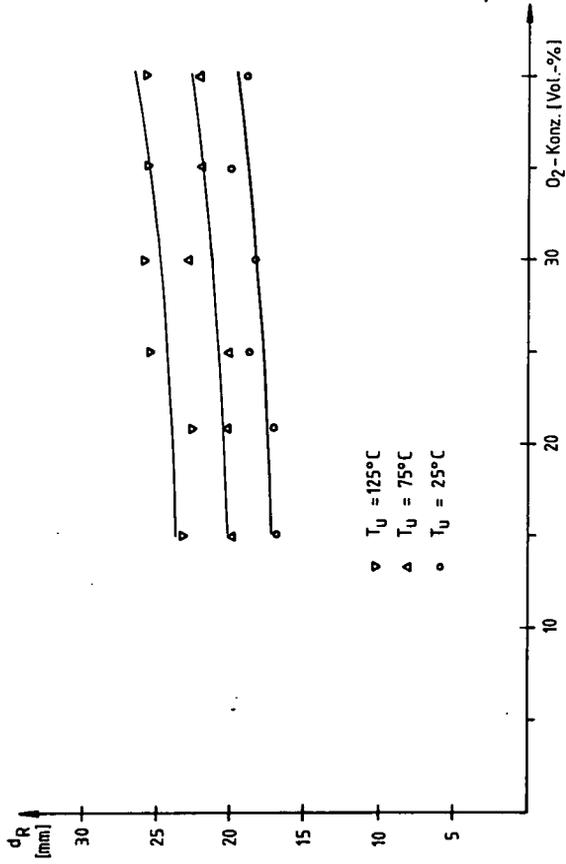


Bild 18: Dicke der Glimmzonen in horizontalen Zellstoffstäben in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration bei verschiedenen Umgebungstemperaturen

Auf den für das Erscheinungsbild eines Brandes sehr wichtigen Brandrauch wird hier nicht eingegangen. Für den Brandbegriff im Versicherungswesen hält man das Merkmal **Rauch** für unerheblich.

## 4 Chemische Reaktionen bei Verbrennungsvorgängen

### 4.1 Oxidation

Oxidationsreaktionen sind die für die Energieerzeugung bestimmenden Reaktionen einer Verbrennung. Dennoch ist zwischen den Begriffen **Verbrennung** einerseits und **Oxidation** bzw. **Reduktion** andererseits eine klare Abgrenzung nicht nur erwünscht, sondern dringend geboten. Für eine Beschreibung der Reaktionstypen, die sich bei einer Verbrennung abspielen, reicht der Begriff Oxidation allein nicht aus.

Unter Verbrennung versteht man den Gesamtkomplex aller mit dem, wie das letzte Kapitel gezeigt hat, sehr differenziert zu betrachtenden Prozeß zusammenhängenden Teilvorgänge, also die Zufuhr der Eingangsgrößen (brennbare Stoffe und Oxidationsmittel (meist Luft)), chemische Reaktionen, Stoff- und Wärmetransport, Wärme- und Lichtemission, Emission der verbrannten Stoffe (Rauch) usw..

Dagegen handelt es sich bei den Begriffen Oxidation und Reduktion um die im eingeschränkt chemischen Sinne zu verwendende Bezeichnung für bestimmte Reaktionstypen. Unter **Oxidation** im konventionellen Sinne versteht man - wie bereits erwähnt - Reaktionen mit Sauerstoff unter Bildung sauerstoffhaltiger Verbindungen:

1) chemische Elemente:

beispielsweise Wasserstoff zu Wasser:



Kohlenstoff zu Kohlenmonoxid:



Eisen zu Eisen(III)-oxid:



aber auch Stickstoff zu Stickstoffmonoxid:



Die zuletzt genannte Reaktion ist im Übrigen endotherm; es wird also Energie verbraucht.

2) chemischen Verbindungen:

Methan zu Kohlendioxid und Wasser:



Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid:

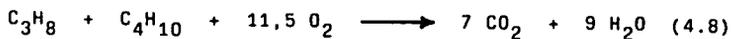


Stickstoffmonoxid zu Stickstoffdioxid:



3) Stoffgemische:

Propan und Butan im Verhältnis 1 : 1:



Dieser Oxidationsbegriff läßt sich zwanglos erweitern auf Reaktionen, bei denen ein Stoff Sauerstoff abspaltet und andere Stoffe oxidiert:

1) Reaktion von Aluminium mit Eisenoxid (aluminothermische Reaktion):



2) Reaktion von Kaliumchlorat mit Kohlenstoff:



Umgekehrt faßt man unter dem Begriff **Reduktion** Reaktionen zusammen, bei denen Sauerstoff abgespalten wird, also etwa

den Zerfall von Quecksilberoxid in Sauerstoff und Quecksilber:



aber auch Reaktionen, bei denen ein Stoff einem anderen Sauerstoff entzieht. Siehe dazu die Gleichungen (4.9) und (4.10), bei denen Aluminium das Reduktionsmittel für Eisenoxid bzw. Kohlenstoff für Kaliumchlorat darstellt.

Wegen der Kopplung von Oxidation und Reduktion (im klassischen Sinne) läßt sich auf diese Vorgänge die Bezeichnung **Oxidations-Reduktionsreaktion** oder abgekürzt **Redoxreaktion** anwenden.

Bei physikalischen Untersuchungen erkannte man, daß Oxide bzw. Moleküle mit Sauerstoff als Bindungspartner elektrische Dipole bilden. Die elektrischen Ladungen in den Molekülen sind also nicht gleichverteilt, sondern die negativen Ladungen sind zu den sauerstoffseitigen Enden der Moleküle verschoben. Dies führte in Zusammenhang mit der Aufstellung des Bohr'schen Atommodells zu der neuen Modellvorstellung, daß bei der Oxidation ein Elektronentransfer zum Sauerstoff stattfindet (siehe Bild 19). Bei der konsequenten Weiterentwicklung dieser Idee entstand die neue Defi-

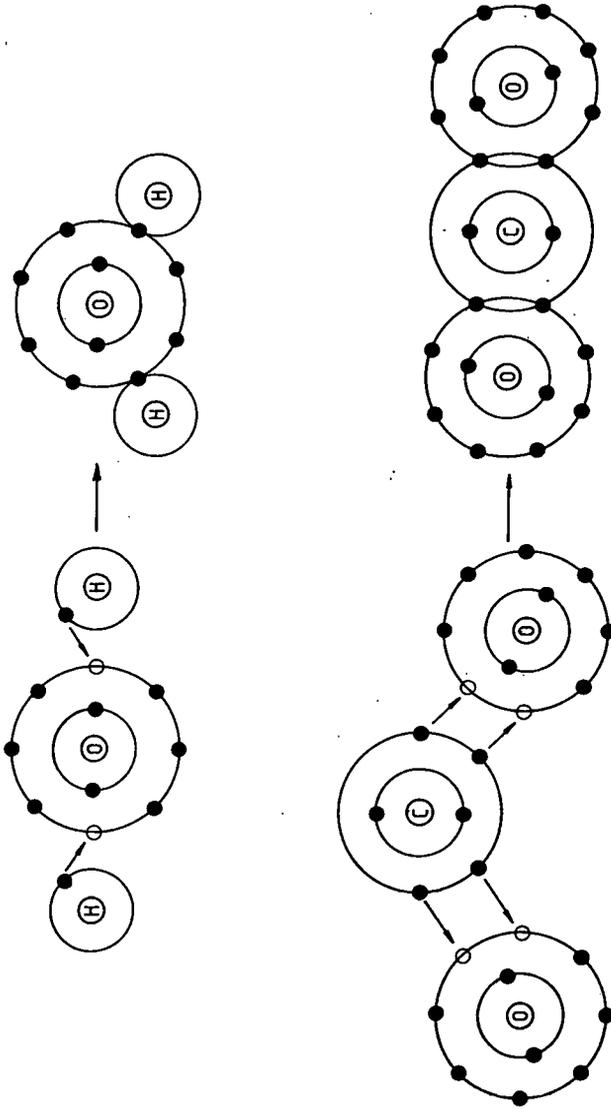


Bild 19: Anschauliche Darstellung des Elektronenübergangs bei der Oxidation von Wasserstoff (H) zu Wasser und Kohlenstoff (C) zu Kohlendioxid

nition, nach der die Oxidation in einem Entzug von Elektronen und die oxidierende Wirkung in der Eigenschaft eines Oxidationsmittels besteht, Elektronen anzuziehen. Analog ist die Reduktion eine Reaktion, bei der Elektronen aufgenommen werden.

Auf diese Weise werden andere Elemente, die ebenfalls Elektronen anziehen, etwa die Halogene Fluor, Chlor und Brom, aber auch der Schwefel, dem Sauerstoff gleichgestellt, und es läßt sich zwanglos die oxidierende Wirkung von sauerstofffreien Oxidationsmitteln erklären.

Beispiele:

- 1) die Oxidation von Wasserstoff durch Chlor zu Chlorwasserstoff (Chlorknallgasreaktion):



- 2) die Oxidation von Eisen durch Chlor zu Eisenchlorid (Reaktion beim sog. Chlorbrand von Eisen):



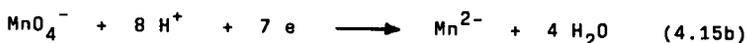
- 3) Eisenpulver reagiert mit Schwefel unter starker Wärmeentwicklung bei heller Weißglut zu Eisensulfid:



Im Prinzip sind bei diesen Reaktionen ebenfalls Oxidation und Reduktion miteinander gekoppelt. Wasserstoff bzw. Eisen geben Elektronen ab, werden also oxidiert, Chlor bzw. Schwefel nehmen Elektronen auf und werden damit reduziert.

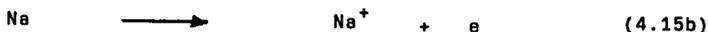
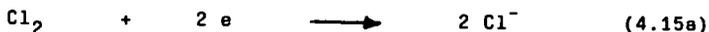
Der Begriff **Redoxreaktion** hat sich in der Chemie allerdings als Bezeichnung für einen häufig vorkommenden Typ elektrochemischer Reaktionen in wässrigen Lösungen oder auch in Schmelzen

(also vorwiegend in flüssigen Phasen) einschließlich der Vorgänge an Phasengrenzflächen (flüssig/fest) eingebürgert, bei dem elektrische Ladungen ausgetauscht werden. Als Beispiel sei hier die Oxidation von zweifach positiv geladenen zu dreifach positiv geladenen Eisenionen durch Kaliumpermanganat in schwefelsaurer wässriger Lösung genannt. Das stark violette Permanganation wird unter Entfärbung zu zweifach positiv geladenen Manganionen reduziert:



Formal läßt sich die Gesamtraktion (4.15c) in zwei Teilreaktionen gliedern, die Oxidationsreaktion (4.15a) und die Reduktion (4.15.b).

Die Schreibweise dieser chemischen Gleichungen besagt jedoch nicht, wie die entstehenden Moleküle aufgebaut und die Elektronen innerhalb dieser Moleküle verteilt sind. Die Elektronen brauchen nicht von einem Bindungspartner zum anderen übergehen. Dies ist nur bei den aus Ionen aufgebauten chemischen Verbindungen der Fall. So übernimmt bei der Oxidation von Natrium durch Chlor jedes Chloratom jeweils ein Elektron von jedem Natriumatom, so daß Moleküle aus einfach negativ geladenen Chlorionen und einfach positiv geladenen Natriumionen entstehen:





Die formale Schreibweise NaCl (Kochsalz) gibt nur die sog. stöchiometrische Zusammensetzung wieder. Im Ionenkristall (NaCl)<sup>n</sup> (n ist die Zahl der Na-Ionen und Cl-Ionen und stellt daher eine sehr große Zahl dar) sind vorwiegend elektrostatische Anziehungskräfte zwischen den Ionen wirksam, so daß jedes Chlorion von 6 Natriumionen und jedes Natriumion von 6 Chlorionen umgeben ist. Auf diese Weise entsteht ein sog. kubisches (würfelförmiges) Kristallgitter.

Die bei der Oxidation von wasserstoff- und kohlenstoffhaltigen Verbindungen entstehenden Oxide Wasser und Kohlendioxid, die Hauptprodukte der Verbrennungsprozesse bei Bränden, besitzen einen anderen Molekülaufbau. Im Wassermolekül sind jedem Sauerstoffatom eindeutig zwei Wasserstoffatome zugeordnet, im Kohlendioxidmolekül entsprechend jedem Kohlenstoffatom zwei Sauerstoffatome. In diesen Molekülen besitzen die Bindungspartner gemeinsame Elektronenpaare. Diese Art der chemischen Bindung wird als kovalente Bindung bezeichnet. Die elektrischen Ladungen der Elektronen sind nur teilweise zum Sauerstoff hin verschoben. Der in Bild 19 dargestellte Elektronenübergang macht also eine rein formale Betrachtungsweise deutlich.

Zur theoretischen Erklärung des kovalenten Bindungstyps hat sich das Bohr'sche Atommodell als wenig geeignet erwiesen. Man muß hier Vorstellungen der modernen Quantenmechanik einbeziehen und beschreibt die Verteilung der Elektronen in solchen Molekülen mit Hilfe wellenmechanischer Vorstellungen. Die gemeinsamen Elektronenbahnen der Moleküle werden als **Molekülorbitale** bezeichnet. Auf weitere Einzelheiten soll hier nicht eingegangen werden. Einen Eindruck vom gewinkelten Aufbau des H<sub>2</sub>O-Moleküls und der mit Hilfe der sog.  $\Psi$ -Funktion abgeschätzten (eine völlig exakte Berechnung ist bisher nicht möglich) Wechselwir-

kungen der Elektronen mit gleichem oder unterschiedlichem Spin vermittelt Bild 20.

#### 4.2 Kettenreaktionen

Bei Verbrennungsprozessen in Flammen treten als reaktive, sehr energiereiche, aber instabile Zwischenstufen Radikale<sup>\*)</sup>, Atome und z.T. auch Ionen auf. Die Reaktionen stellen also eine Aufeinanderfolge und Verzweigung zahlreicher Reaktionsschritte (auch Elementarreaktionen genannt) dar. Es bilden sich viele instabile, aber auch chemisch stabile Zwischenprodukte, ehe die Anfangsstoffe in die Endstoffe umgewandelt sind. So müssen beispielsweise schon formal die Wasserstoff- und die Sauerstoffmoleküle erst in Atome gespalten werden, ehe sie sich zu Wassermolekülen vereinigen können.

Wegen des im Vergleich zu Redoxreaktionen in Lösungen völlig andersartigen Reaktionsablaufes heißen diese Reaktionstypen Kettenreaktionen. Auch die Bezeichnung Radikalreaktionen ist üblich, weil vor allem elektrisch nicht geladene Atome und Molekülbruchstücke (eben die Radikale) beteiligt sind. Am vereinfachten Schema der Methanverbrennung mit Sauerstoff wird gezeigt (Bild 21), wie solche Kettenreaktionen ablaufen (FRISTROM/WESTENBERG). Durch Computersimulation wurden inzwischen noch zahlreiche weitere, für Flammen charakteristische Elementarreaktionen gefunden (GARDINER JR./OLSON, 1980).

Bei der Zündung werden einige Brennstoffmoleküle durch die Zündenergie  $E$  zu Methylradikalen und Wasserstoffatomen gespalten (siehe Bild 21). Ähnliche Spaltraktionen finden auch an Begleitstoffen, z.B. Wassermolekülen statt. Die Atome und Radikale

---

\*) Ein reaktives, elektrisch neutrales Teilchen mit einem ungepaarten Elektron (im Gegensatz zum elektrisch geladenen Ion) bezeichnet man in der Chemie als Radikal.

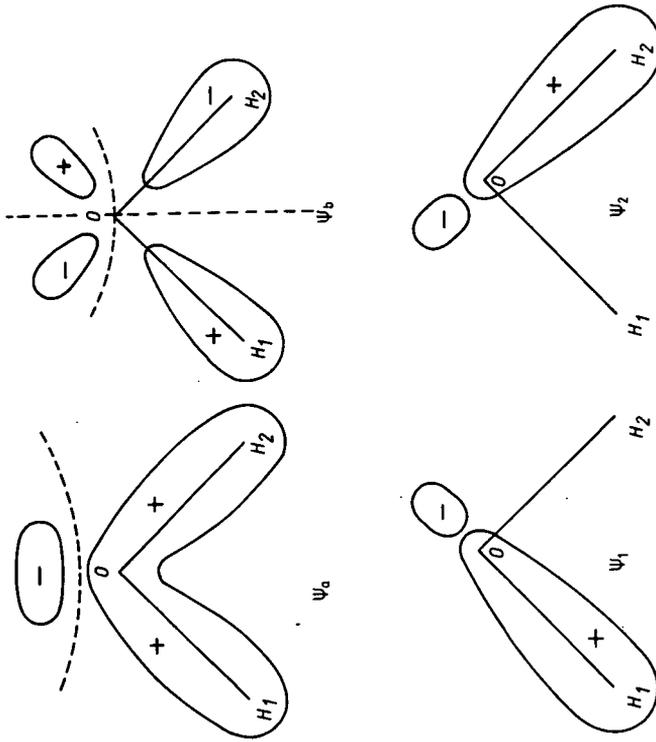


Bild 20: Wellenmechanische Vorstellung der chemischen Bindung im Wassermolekül, bindende Elektronen mit antiparallelem, nichtbindende Elektronen mit parallelem Spin

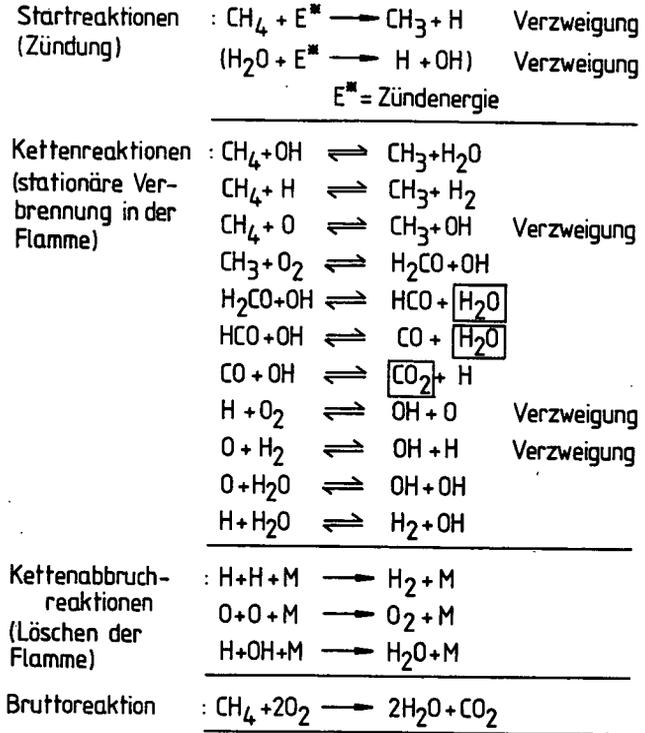


Bild 22: Kettenreaktionen bei der Verbrennung von Methan mit Sauerstoff (nach FRISTRÖM/WESTENBERG)

greifen noch intakte Moleküle an, und es bilden sich neue Teilchen. Wichtig für den Fortgang der Reaktion ist, daß bei sog. Verzweigungsreaktionen mehr reaktive Teilchen entstehen, als verbraucht werden. So erfolgt nach einer Vielzahl von Reaktionsschritten schließlich die Bildung der Endprodukte Kohlendioxid und Wasser.

Stoßen Teilchen an einer Wand (M) zusammen, so können sie sich unter Energieabgabe an die Wand zu stabilen Molekülen vereinigen. Durch diese Vernichtung reaktiver Teilchen wird die Kettenreaktion unterbrochen (Kettenabbruchreaktionen). Nimmt die Menge der aktiven Teilchen durch Wandreaktionen stark ab, kann die Flamme sogar gelöscht werden.

Das Flußdiagramm in Bild 22 stellt dar, wie man sich den Abbau größerer Kohlenwasserstoffmoleküle in Flammen vorstellt, und vor allem, wie sich Vorstufen der Bildung von Ruß in Flammen entwickeln (GARDINER JR., 1982). Es konnte gezeigt werden (WAGNER, 1985), daß Ruß sogar entsteht, wenn der Flamme eine stöchiometrisch ausreichende Menge Sauerstoff für die Verbrennung zugeführt wird. Die Rußbildung ist also kinetisch, d.h. durch die verschiedenen Geschwindigkeiten der miteinander konkurrierenden Reaktionen in der Flamme bedingt. Daß große Mengen Ruß in den Flammen bei einem Brand bei Sauerstoffmangel entstehen, braucht kaum erwähnt zu werden.

Auch die Pyrolysereaktionen an Festkörpern laufen i.w. nach Radikalkettenmechanismen ab. Da durch die Pyrolyse das Zünd- und Brandverhalten stark beeinflusst wird, sind solche thermischen Abbaureaktionen Gegenstand intensiver Forschungen (MOUSSA, 1977; ROGERS/OHLEMILLER, 1978; HILADO/CASEY, 1979; LÖHMER, 1988 und viele andere).

Im Zusammenhang mit der Definition des Brandbegriffs ist besonders wichtig, daß die Pyrolyse von cellulosehaltigen Stoffen (Holz, Zellstoff, Papier) schon bei Temperaturen oberhalb von

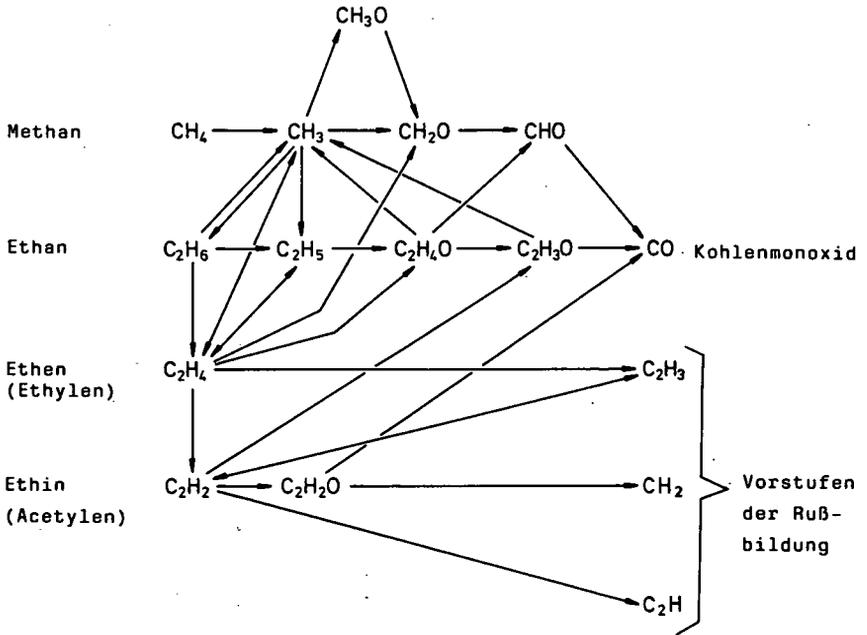


Bild 22: Flußdiagramm über den chemischen Abbau von niedrigen Kohlenwasserstoffen in Flammen durch Kettenreaktionen (nach GARDINER JR.)

ca. 120 °C beginnen kann. Die meisten Pyrolysereaktionen sind endotherm, d.h. sie verbrauchen Wärme. In Holz kann jedoch eine **exotherme Pyrolyse**, d.h. eine Pyrolyse, bei der Wärme entwickelt wird, bereits bei Temperaturen um 200 °C einsetzen. Dies ist für die Selbstentzündungsneigung von Holz bei nur mäßig erhöhten Temperaturen von größter Bedeutung (SEEGER/WERTHENBACH, 1967; JOHN, 1969). Die Selbstentzündung von Heu und anderen Naturprodukten, die im unteren Temperaturbereich durch bakteriologische Prozesse ausgelöst wird und dann in eine exotherme Pyrolyse übergeht, ist bekannt (JACH, 1972).

Eine Verbrennung führt also letztendlich auch über den Radikalkettenmechanismus zu den Oxidationsprodukten der Anfangsstoffe, wenn auch in den meisten Molekülen der Endstoffe nur eine partielle Verschiebung der elektrischen Ladungen und damit der Elektronen stattfindet. Obwohl also auch eine mit der Oxidation gekoppelte Reduktion stattfinden muß, ist es in der Chemie nicht üblich, den Begriff **Redoxreaktion** auf die Reaktionstypen bei Verbrennungen in Flammen oder an Festkörpern anzuwenden. Die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser in Brennstoffzellen zur elektrischen Stromerzeugung, die bei wesentlich tieferen Temperaturen als in Flammen mit einem typischen Redoxmechanismus abläuft, bezeichnet man gelegentlich auch als sog. kalte Verbrennung.

Es ist daher ratsam, den in der Chemie sehr speziell verwendeten Begriff **Redoxreaktion** im Zusammenhang mit dem **Brandbegriff** des Versicherungswesens nicht mehr zu verwenden. Der allgemeinere Begriff **Verbrennung** eignet sich besser, um die komplexen Vorgänge bei einem Brand zu beschreiben.

## 5 Energieumsatz bei einem Brand

### 5.1 Wärmeentwicklung

Damit eine Oxidationsreaktion als Verbrennung ablaufen kann, müssen die folgenden Bedingungen erfüllt sein:

- 1) Die Reaktion muß freiwillig und exotherm sein;
- 2) die Geschwindigkeit der Wärmefreisetzung, die direkt proportional der Reaktionsgeschwindigkeit ist, muß groß genug sein, damit die für die Verbrennung erforderlichen hohen Temperaturen erreicht werden.

Es ist zwar eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung, daß die Oxidation exotherm (d.h. mit Wärmefreisetzung) verläuft.

Die bei einer Reaktion maximal freiwerdende Wärme wird nach den in der chemischen Thermodynamik geltenden Vereinbarungen folgendermaßen angegeben:

- a) die Reaktion führt vollständig von den Anfangs- zu den Endstoffen;
- b) der Anfangsdruck und der Enddruck im System sind gleich, vereinbarungsgemäß meist atmosphärischer Druck;
- c) Anfangs- und Endtemperatur im System sind gleich und zwar  $25^{\circ}\text{C} = 298\text{ K}$ , d.h. die zwischenzeitlich durch die Reaktion erhitzten Endprodukte müssen die entwickelte Wärme wieder vollständig an die Umgebung abführen;
- d) die an die Umgebung abgegebene Wärme hat negatives (die von einer Reaktion ggfs. aufgenommene Wärme positives) Vorzeichen.

Unter den Voraussetzungen a) - d) bezeichnet man die bei einer Reaktion umgesetzte Wärme als Reaktionsenthalpie  $\Delta H$ . Die Bedingungen a) - c) ( d) ist nur eine Festlegung) sind zwar bei einem Brand und selbst bei einer unter optimalen Bedingungen ablaufenden technischen Verbrennung nie erfüllt. Damit man aber den Energieumsatz verschiedener Reaktionen und Prozesse mit-

einander vergleichen und an einem (hypothetischen aber nach aller Erfahrung vernünftigen) Idealzustand messen kann, sind solche genauen Festlegungen erforderlich. Die Größe Enthalpie - und thermodynamische Größen grundsätzlich - gibt keine Auskunft über die Zeit, in der die Wärme freigesetzt wird, und enthält damit auch keinen Parameter für die Reaktionsgeschwindigkeit.

$$\Delta H = \Delta U + p \cdot \Delta V = - Q_R \quad (5.1)$$

$\Delta U$  : Reaktionsenergie;

$p \cdot \Delta V$ : Volumenarbeit (Term für den Sachverhalt, daß die bei der Verbrennung freiwerdenden Gase gegen den Atmosphärendruck expandieren und damit Arbeit leisten müssen);

$Q_R$  : Reaktionswärme.

Die Enthalpie exothermer Oxidationsreaktionen kann experimentell bestimmt werden, indem man den zu untersuchenden Stoff unter standardisierten Bedingungen im sog. Bombenkalorimeter in reinem Sauerstoff unter Druck (um eine vollständige Umsetzung zu gewährleisten) verbrennt. Die freiwerdende Wärme wird an eine definierte Wassermenge abgegeben, deren Temperaturerhöhung exakt registriert wird (ULLMANNs ENZYKLOPÄDIE DER TECHNISCHEN CHEMIE, 1961; HEMMINGER/HÖHNE, 1984). Da die Reaktionsenthalpie unabhängig von dem Weg ist, auf dem die Reaktion abläuft (HESSscher Satz der konstanten Wärmetönungen), ist es möglich, Enthalpien von Teilschritten einer Reaktion, bzw. auch unbekannte Reaktionsenthalpien zu berechnen. So ist die Differenz der Reaktionsenthalpien



und



gleich der Enthalpie der Reaktion



Insofern spielt auch der Mechanismus einer Kettenreaktion keine Rolle für die bei der Verbrennung freigesetzte Wärme, wenn nur die Endprodukte im gleichen Mengenverhältnis erzeugt werden.

In Tabelle 1 sind eine Reihe von Enthalpiewerten zusammengestellt. Zum Vergleich sind auch Enthalpiewerte berücksichtigt, die für Verbrennungsvorgänge in Bränden kaum eine Bedeutung besitzen.

Für praktisch technische Bedürfnisse bestimmt man unter vergleichbaren Bedingungen (DIN 5499) den sog. **Brennwert**  $H_o$  (früher als **oberer Heizwert** bezeichnet). Der spezifische Brennwert eines festen oder flüssigen Stoffes ist definiert als Quotient aus der negativen Reaktionsenthalpie und der Masse  $M$  bzw. eines Gases als entsprechender Quotient aus der negativen Reaktionsenthalpie und dem Volumen  $V_N$  bei Normalbedingungen ( $0^\circ \text{C}$ ; 1013 mbar).

$$H_o = - \frac{\Delta H}{M} \quad (5.3a)$$

$$H_o = - \frac{\Delta H}{V_N} \quad (5.3b)$$

Der Brennwert wird auf folgende genormte und international einheitlich festgelegte Bedingungen bezogen:

- 1) Anfangs- und Endtemperatur betragen  $25^\circ \text{C}$ , sind also gleich;
- 2) Wasser liegt vor und nach der Verbrennung flüssig vor;

Reaktion	Reaktionsenthalpie $\Delta H_R$ in kJ/mol <sup>x)</sup>
Al + 3/2 O <sub>2</sub> → 1/2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- 831,0
Fe + 1/2 O <sub>2</sub> → FeO	- 267,1
Fe + 3/2 O <sub>2</sub> → 1/2 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- 408,8
Fe + Cl <sub>2</sub> → FeCl <sub>2</sub>	- 344,0
Fe + 3/2 Cl <sub>2</sub> → FeCl <sub>3</sub>	- 400,2
CH <sub>4</sub> + 2 O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub> + 2 H <sub>2</sub> O	- 889,5
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> + 7/2 O <sub>2</sub> → 2 CO <sub>2</sub> + 3 H <sub>2</sub> O	-1558,3
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> + 5 O <sub>2</sub> → 3 CO <sub>2</sub> + 4 H <sub>2</sub> O	-2217,9
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> + 3 O <sub>2</sub> → 2 CO <sub>2</sub> + 2 H <sub>2</sub> O	-1409,5
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> + 5/2 O <sub>2</sub> → 2 CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	-1298,3
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> + 15/2 O <sub>2</sub> → 6 CO <sub>2</sub> + 3 H <sub>2</sub> O	-3265,0

<sup>x)</sup> bezogen auf je 1 Mol des zu oxidierenden Stoffes

Tabelle 1: Reaktionsenthalpien ausgewählter Oxidationsreaktionen

- 3) Die Verbrennung von Kohlenstoff verläuft vollständig zu Kohlendioxid, von Schwefel zu Schwefeldioxid;
- 4) Stickstoff wird nicht oxidiert.

Überlegt man, daß bei der Festlegung der Leistung technischer Verbrennungsanlagen die bei der Kondensation von Wasserdampf freiwerdende Wärme i.a. nicht genutzt werden kann, d.h. daß das Wasser als Wasserdampf aus dem Schornstein entweicht, so erscheint es zweckmäßig, eine modifizierte Größe einzuführen, den Heizwert  $H_u^*$ ). Den Heizwert erhält man, indem vom Brennwert  $H_o$  die Kondensationswärme (bzw. -enthalpie) des bei der Verbrennung erzeugten Wasserdampfes subtrahiert wird:

$$H_u = H_o - r \cdot w_{H_2O} \quad (5.4)$$

Dabei bedeuten:

$r = 2442 \text{ kJ/kg}$ : die spezifische Verdampfungsenthalpie des Wasserdampfes bei  $25^\circ \text{C}$ ;

$w_{H_2O}$  : das Verhältnis der Masse des Wassers zur Masse der Brennstoffprobe.

Für die Bestimmung des Heizwertes brennbarer Gase gilt eine analoge Beziehung.

Der Heizwert als Größe zur Charakterisierung der Wärmeabgabe einer technischen Verbrennung hat sich nicht international durchgesetzt und wird speziell in Deutschland angewendet.

---

\*) Siehe hierzu die Diskussion um den "Brennwertkessel", der auch den größten Teil der Verdampfungswärme des Wassers ausnutzt.

Die Tabellen 2 und 3 enthalten ausgewählte Brennwerte und Heizwerte von brennbaren festen Stoffen, Flüssigkeiten und Gasen.

Die **Brandbelastung**  $q$  ist nun in Anlehnung an die bei technischen Feuerungen getroffenen Festlegungen eine Größe, die die bei einem Brand potentiell freigesetzte Wärme darstellen soll. Die Brandbelastung eines Raumes, Geschosses, Bauwerks oder durch Brandwände abgetrennten Brandabschnitts eines Gebäudes ist das Produkt der auf die Fläche  $F$  bezogenen Massen  $M$  der vorhandenen brennbaren Stoffe und dem Heizwert dieser Stoffe. Die Brandbelastung stellt also die maximale Verbrennungswärme dar, die bei einem Brand theoretisch je  $m^2$  Fläche entstehen und auf die Umgebung einwirken kann:

$$q = \frac{\sum_i (M_i \cdot H_{u,i})}{F} \quad (5.5)$$

$q$  : freiwerdende Wärme in  $MJ/m^2$ ,  $kWh/m^2$  ;  
 $M_i$  : Masse des brennbaren Stoffes  $i$  in kg;  
 $H_{u,i}$  : Heizwert des Stoffes  $i$  in  $MJ/kg$ ,  $kWh/kg$ .

Es gelten folgende Umrechnungsfaktoren:

1 MJ = 0,28 kWh (= 240 kcal);  
1 kWh = 3,6 MJ (= 860 kcal).

Man hat also hier aus Gründen der Objektivierbarkeit und der besseren Vergleichbarkeit eine aus der Feuerungstechnik stammende und aus der Thermodynamik abgeleitete Größe in Brandschutzbetrachtungen eingeführt.

Die meistem brennbaren Stoffe brennen aber beim Brand eines Gebäudes nur unvollständig ab im Gegensatz zur Feuerungsanlage, wo man auf eine möglichst optimale Energieausbeute Wert legen muß. Das Abbrandverhalten wird weitgehend durch den Materialzustand (Gestalt, spezifische Oberfläche, Lagerungsdichte, Verbund mit

Stoff	Rohsubstanz im Verwendungszustand		wasser- und asche-freie Substanz		Bemerkungen
	$H_o$ [ kJ/kg ]	$H_u$ [ kJ/kg ]	$H_o$ [ kJ/kg ]	$H_u$ [ kJ/kg ]	
Europäische Hölzer (Mittelwert)	9910	8400	} 19930	18550	frisch
	16860	15310			
Tropische Hölzer	17970	16590	} 20850	19640	lufttrocken
	16720	15260			
Torf (Schleswig - Holstein)	9960	8100	} 26750	25660	
	20580	19260			
Rohbraunkohle (Rheinland)	32670	31890	35920	35130	
Brikett	30850	29680	33900	32700	
Anthrazit, Stückkohle (Ruhr)					
Gasflammkohle, Stückkohle (Ruhr)					
Weizenstroh, getrocknet	13110	11720	15250	13930	
Müll (Mittelwert, deutsche Großstädte)		4200			

Tabelle 2: Brennwert und Heizwert fester brennbarer Stoffe (nach LANDOLT/BÖRNSTEIN)

Brennbare Gase

Stoff	H <sub>0</sub> [kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	H <sub>u</sub> [kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
Wasserstoff	12750	10740
Methan	39790	36990
Propan	101660	93420
Erdgas (Naturgas, Bentheim)	37730	33890
Raffineriegase (Crackgase)	65400	60080

Brennbare Flüssigkeiten

Stoff	H <sub>0</sub> [kJ/kg]	H <sub>u</sub> [kJ/kg]
Hexan	48280	44600
Äthylalkohol	29850	26920
Super - Benzin	44720	42170
Diesel / Heizöl EL	45960	42970

Tabelle 3: Brennwert und Heizwert von brennbaren Flüssigkeiten und Gasen (nach LANDOLT/BÖRNSTEIN)

anderen Stoffen, Verteilung im Raum und Raumgeometrie sowie durch die Ventilation) beeinflußt. Andererseits kann durch einen sehr schnellen Abbrand, z.B. brennbarer Lösungsmittel, die Wärmebelastung eines Gebäudes stärker sein als bei einem "normalen" Brand von Holz. Das Brandverhalten von Holz ist besonders gut erforscht, und Brände genormter Holzstapel, sog. Holzkrippen, einschließlich ihrer Wirkungen auf die Umgebung eignen sich daher am besten für Vergleiche. Den Unterschieden zwischen verschiedenen Materialkonfigurationen, die auch die Wärmefreisetzungs-geschwindigkeit berücksichtigen, versucht man neuerdings vor allem für industriell genutzte Gebäude durch den sog. Abbrandfaktor  $m$  Rechnung zu tragen (siehe dazu V DIN 18230: Brandschutz im Industriebau, Teile 1 und 2; 11.1982). Mit dem Abbrandfaktor wird aus der mit dem Heizwert ermittelten Brandbelastung eine bewertete bzw. rechnerische Brandbelastung bestimmt:

$$q_b = m \cdot q \quad (5.6a)$$

oder

$$q_b = \frac{\sum (m_i \cdot M_i \cdot H_{u,i})}{F} \quad (5.6b)$$

$m$  wird experimentell in einer Brandkammer mit einem Volumen von  $8 \text{ m}^3$  bestimmt, in der jeweils 50 kg des Materials in der zu untersuchenden Konfiguration verbrannt werden. Die Tabelle 4 enthält Beispiele für den Abbrandfaktor verschiedener Holzwerkstoffe. In Tabelle 5 sind ebenfalls beispielhaft Werte für Brandbelastungen und bewertete Brandbelastungen von Industriegebäuden zusammengestellt.

## 5.2 Wärmeübertragung

Zwischen Körpern unterschiedlicher Temperatur mit der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  wird Wärme übertragen, so daß ein Wärmestrom  $\dot{Q}$  vom heißeren zum kälteren Körper fließt. Bei einem Brand kann man

Material	H <sub>U</sub> (kWh/kg)	Lagerungsdichte <sup>*)</sup> (%)	m
Holz und Holzwerkstoffe			
Fichtenholz			
Bretter	4,8	50	1,0
		70	0,8
Kanthölzer, 40 mm × 40 mm	4,8	50	1,0
Kanthölzer, 100 mm × 100 mm	4,8	50	0,7
		90	0,5
Kanthölzer, 200 mm × 200 mm	4,8	50	0,3
		95	0,2
Kanthölzer, zu Blöcken 500 mm × 500 mm	4,8	50	0,2
dicht gefügt		98	0,2
Rundholz, geschält ø 150 ... 300 mm	4,8	50	0,5
Holzwalze, lose geschüttet	4,7	8	1,0
Holzwalze, gepreßt zu Einzelballen		60	0,2
Spanplatten (B2 nach DIN 4102)	4,8	99	0,2

\*) Lagerungsdichte : Materialvolumen / Gesamtvolumen oder Schüttfläche / Rohfläche

Tabelle 4: Abbrandfaktor von Holzwerkstoffen (Beispiele nach DIN 18230)

Gebäude-Nutzung	q [kWh/m <sup>2</sup> ]	q <sub>b</sub> [kWh/m <sup>2</sup> ]	Gebäude-Nutzung	q [kWh/m <sup>2</sup> ]	q <sub>b</sub> [kWh/m <sup>2</sup> ]
Elektromechan. Fertigung	20	17			
Lehrwerkstatt für Elektrotechnik	30	28	Buchdruckerei	323	119
Labor eines Elektrobetriebes	66	42	Binderei eines Verlages	344	100
Büromasch. u. Elektrofertigung	84	70	Lagerhalle eines Verlages	1258	403
Fertigungshalle (flüssige Kunstst.)	41	26	Tuffing - Fertigung	357	273
Fertigungshalle (feste Kunstst.)	74	51	Teppichlagerhalle	483	323
Fertigungshalle d. Zuckerveredel.	661	537			
Polypropylen-Fertigungshalle	2112	275			
Montagehalle f. Musikinstrumente	88	71	Auto - Ersatzteillager	127	101
Montage Unterhaltungselektronik	98	76	Lager der Kunststoffindustrie	239	164
Montage f. Lautsprecherboxen	250	168	Lager f. elektrotech. Fertigungsmat.	260	71
			Getränkeauslieferungslager	391	150
Holzbearbeitung f. Lautsprecherb.	128	50	Reifenlagerraum	1062	531
Holzbearbeitung	195	74	Lacklagerraum	1189	154,7
			Harzlagerr. f. Kunststoffverarbeitung.	1265	537
			Hochregallager	5657	1251

Tabelle 5: Ausgewählte Beispiele für Brandbelastungen von Industriegebäuden (nach SCHNEIDER)

(von wenigen Ausnahmen abgesehen) davon ausgehen, daß der Brandherd die höhere Temperatur und die Umgebung eine niedrigere Temperatur besitzen. Die Wärmeübertragung erfolgt durch Wärmeleitung  $\dot{Q}_L$ , Konvektion  $\dot{Q}_K$  und Wärmestrahlung  $\dot{Q}_S$ . Um die Wärmeeinwirkung eines Brandes auf seine Umgebung (Bauteile, Werkstoffe, Einrichtungen) zu ermitteln, stellt man eine Wärmebilanz auf, d.h. man schätzt die Verteilung der gesamten, durch den Brand erzeugten und von der Umgebung aufgenommenen Wärme ab.

Die Wärmeübertragung von einem vollentwickelten Brand auf die Umgebung erfolgt vor allem durch Strahlung und Konvektion; die Wärmeleitung kann meist vernachlässigt werden. Zu berücksichtigen ist aber die Wärmeabführung  $\dot{Q}_A$  durch den Brandrauch und die erhitzte Luft. Mit Hilfe des 1. Hauptsatzes der Thermodynamik, der besagt, daß die Summe der umgesetzten Wärmemengen zu jedem Zeitpunkt gleich Null sein muß, ergibt sich nun die Bilanzgleichung:

$$\dot{Q}_B - (\dot{Q}_S + \dot{Q}_K + \dot{Q}_A) = 0 \quad (5.7a)$$

$$\dot{Q}_B = (\dot{Q}_S + \dot{Q}_K) + \dot{Q}_A \quad (5.7b)$$

Die Wärmeleitung ist aber bestimmend für die Wärmeausbreitung in der unmittelbaren Nachbarschaft des Brandherdes, außerdem für die Durchwärmung von Bauteilen und sonstigen Gegenständen und daher mitverantwortlich für die Ausbreitung eines Brandes.

### 5.2.1 Wärmetransport durch Wärmeleitung

In einem ungleichmäßig erhitzten Körper fließt Wärme ohne Massentransport von Stellen höherer Temperatur zu Stellen niedrigerer Temperatur: Besteht zwischen zwei Seiten einer ebenen Platte mit der Fläche  $F$  und der Dicke  $d$  die Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , so ist der in der Zeit  $t$  durch die Platte gehende Wärmestrom  $\dot{Q}_L$

$$Q_L = \lambda_Q \cdot (F/d) \cdot t \cdot \Delta T \quad (5.8)$$

Der Proportionalitätsfaktor  $\lambda_0$  wird als Wärmeleitzahl oder Wärmeleitkoeffizient in  $J/(m \cdot h \cdot K)$  bezeichnet. Gleichung (5.8) gilt, wenn

- 1) die Temperatur auf beiden Seiten der Platte während der gesamten Zeit konstant und
- 2) das Temperaturgefälle innerhalb der Platte annähernd linear ist.

Auf die unter allgemeinen Bedingungen geltende Differentialgleichung, das sog. FOURIERSche Gesetz der Wärmeleitung, wird hier nicht eingegangen.

Metalle sind sehr gute Wärmeleiter, mittlere Wärmeleitfähigkeit besitzen Mauerwerk, Beton und Glas. Schlechte Wärmeleiter sind Gase, Holz, Textilien und - ihrem Zweck entsprechend - wärmedämmende Materialien wie Glas- und Mineralwolle sowie organische Schaumstoffe.

Bei Bränden führt die einseitige starke Wärmebelastung bei wärmedämmenden Materialien wegen des ungenügenden Wärmeabflusses ins Innere des Materials zu einem Wärmestau. Dies kann bei brennbaren Dämmstoffen eine gefährlich Erhitzung, ggfs. eine Entzündung verursachen.

### 5.2.2 Wärmetransport durch Konvektion

Als Konvektion bezeichnet man die mit Massebewegung gekoppelte Wärmeübertragung: Strömung von Gasen, Aerosolen (Rauch), Flüssigkeiten. Dem Wärmetransport innerhalb des strömenden Mediums überlagert sich ein Wärmeübergang durch Wärmeleitung quer zur Strömungsrichtung zwischen Medium und einem anderen Körper (etwa eine Wand), wenn zwischen beiden ein Temperaturgefälle besteht.

Man unterscheidet zwischen freier und erzwungener Konvektion. Ein Temperaturunterschied innerhalb eines Gases oder einer Flüssigkeit führt zu Dichteunterschieden und damit zu einem Druckgefälle. Da das System nach Druckausgleich strebt, entsteht eine

Strömung, die freie Konvektion.

Bei einem Brand kann sich, bedingt durch die großen Dichteunterschiede zwischen den heißen Flammengasen und der kalten Luft, eine starke freie Konvektion ausbilden. Daneben treten durch die schiebende Wirkung der Verbrennungsgase auch erzwungene Strömungen, erzwungene Konvektionen, auf.

Der Wärmeübergang durch Konvektion bei einem Brand läßt sich durch folgende Beziehung beschreiben:

$$\dot{Q}_K = \alpha_K \cdot F \cdot (T_R - T_W) \quad (5.9)$$

Es bedeuten:

$\alpha_K$  : Wärmeübergangskoeffizient (Wärmeübergangszahl) bei einem Brand;

F : angeströmte Fläche (Wand, Decke usw.);

$T_W$  : mittlere Temperatur des Raumes bzw. der Rauchgase;

$T_R$  : mittlere Temperatur der angeströmten Flächen.

$\alpha_K$  kann sehr unterschiedliche Werte annehmen, weil darin alle Einflüsse des strömenden Mediums (Temperatur, Dichte, Strömungsgeschwindigkeit, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme und Viskosität) und der angeströmten Körper (Dichte, spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit, Gestalt und Oberfläche) zusammengefaßt sind. Bei einem Brand liegt  $\alpha_K$  in folgender Größenordnung:

$$\alpha_K \approx 10 \dots 1000 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}).$$

### 5.2.3 Wärmetransport durch Strahlung

Die Wärmestrahlung ist der in Form elektromagnetischer Strahlung abgegebene Anteil der Wärme. Nach dem PLANCKSchen Gesetz ist die Strahlungsenergie  $E_\lambda$  abhängig von der Wellenlänge  $\lambda$  bzw. der Frequenz  $\nu$  der Strahlung. Der Bereich der Wärmestrahlung (Infra-

rotstrahlung (IR, Ultrarotstrahlung) umfaßt die Wellenlängen  $\lambda \approx 0,8$  bis  $800 \mu\text{m}$ . Im Bereich von  $\lambda \approx 0,4$  bis  $0,8 \mu\text{m}$  schließt sich der Bereich des sichtbaren Lichtes an (siehe Bild 23). Die Mechanismen zur Entstehung elektromagnetischer Strahlung werden hier nicht besprochen.

Heiße Gase strahlen nur in schmalen, jeweils charakteristischen Wellenlängenbereichen Energie ab (Linien, Banden). Optisch schwarze Körper oder graue Körper emittieren je nach Temperatur Strahlung kontinuierlich in einem größeren Wellenlängenbereich (Bild 24).

Schwarze Strahler sind in der Lage, die theoretisch maximal mögliche Strahlungsenergie im gesamten Wellenlängenbereich abzugeben, graue Strahler einen je nach dem Wert des Faktors  $\epsilon$  verminderten Anteil. Daher muß auch (wieder theoretisch)  $\epsilon$  unabhängig von der Temperatur und der Wellenlänge der Strahlung konstant sein. Ideale schwarze und graue Strahler gibt es in der Praxis nicht.

Die Gesamtenergie der Strahlung eines schwarzen oder grauen Körpers beträgt nach dem STEPHAN - BOLTZMANNschen Gesetz:

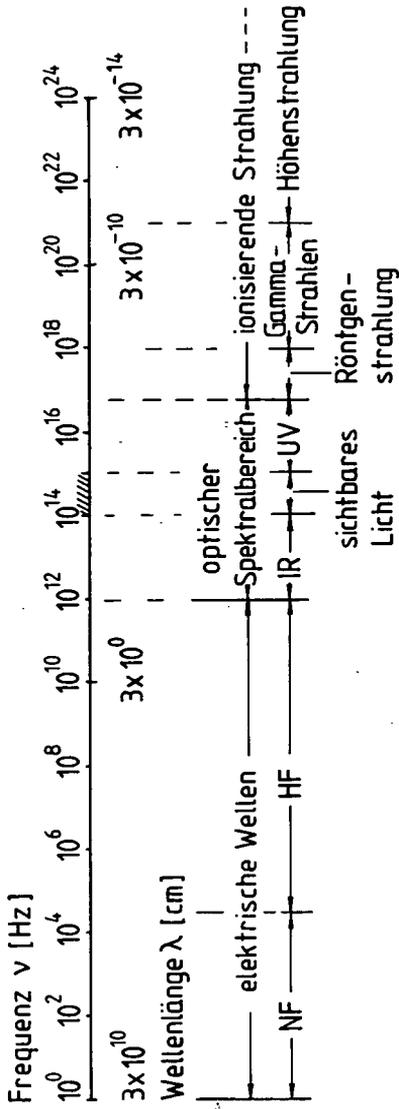
$$E = \epsilon \cdot C_S \cdot (T/100)^4 \quad (5.10)$$

$\epsilon$  : Emissionsverhältnis des grauen Körpers; für den optisch schwarzen Körper gilt  $\epsilon = 1$ ;

$C_S$  : Strahlungszahl des schwarzen Körpers.

Durch Rußpartikel leuchtende Flammen (mit genügend hoher Konzentration der Rußpartikel) werden als Graustrahler angesehen. In diese Kategorie können auch die meisten Brandflammen eingeordnet werden.

Da Körper bei den gleichen Wellenlängen Strahlung absorbieren, bei denen sie auch Strahlung emittieren, gelten für die Strah-



Erhitzung durch Induktion im Nahbereich starker Sender	Erhitzung durch intensive Wärme- und Lichtstrahlung: IR-Strahler, Brennglas, Laser	Erhitzung durch Sekundäreffekte ionisierender Strahlung; Entstehung von Wärme bei Stößen energie-reicher Partikel
--	--	---

Bild 23: Skala der Frequenzen und Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung

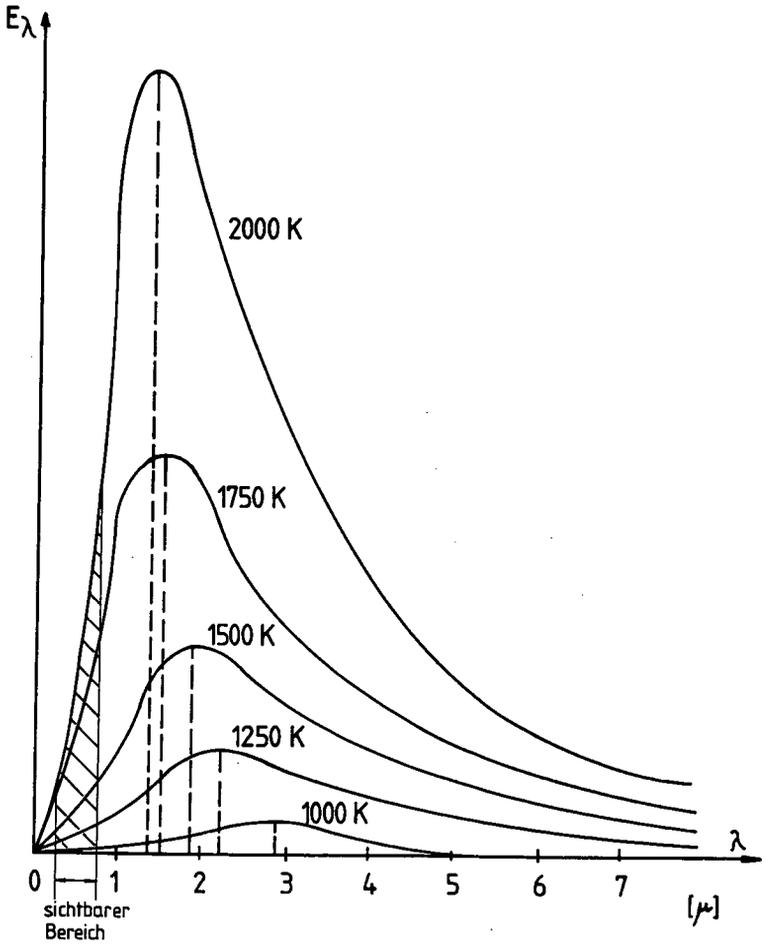


Bild 24: Energieverteilung der Strahlung eines schwarzen Körpers als Funktion der Wellenlänge bei verschiedenen Temperaturen

lungsabsorption entsprechende Gesetze wie für die Strahlungsemission. Für den Wärmeübergang durch Strahlung von einer Brandflamme auf andere Teile (brennbare Teile, Wände) ergibt sich daher in Anlehnung an Berechnungen für Heizkessel sowie unter stark vereinfachenden Annahmen:

$$Q_S = f \cdot a_V \cdot C_S \cdot F_W \cdot [(T_F/100)^4 - (T_W/100)^4] \quad (5.11)$$

$a_V$  : Absorptionsverhältnis der auf die Wand auftreffenden Strahlung;

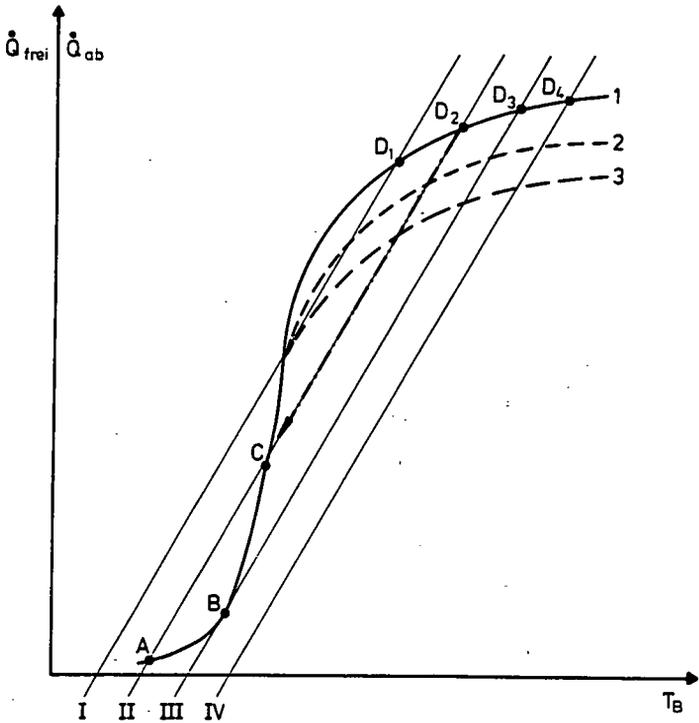
$f$  : Minderungsfaktor, bei Heizkesseln ca. 0,6 bis 1,0; bei Brandflammen i.a. noch niedriger.

Der Strahlungsaustausch zwischen Brand und Umgebung ist in starkem Maße auch von der räumlichen Anordnung abhängig. Auf eine eingehende Darstellung muß hier verzichtet werden.

### 5.3 Wärmeentwicklung und Wärmeableitung in einem Brand

Es wurde bereits ausgeführt, daß sich ein Brand nur in einem exotherm reagierenden Stoffsystem entwickeln kann. Diese Bedingung ist aber nicht ausreichend. Aus Gleichung (5.7) folgt vielmehr, daß sich ein Gleichgewicht zwischen den Geschwindigkeiten von Wärmeentwicklung und Wärmeableitung einstellen muß und zwar auf einem hohen Temperaturniveau. Dieser Zusammenhang ist in Bild 25 vereinfacht dargestellt.

Die stark ausgezogenen Kurven (1;2;3) stellen die Geschwindigkeiten der Wärmeentwicklung in Abhängigkeit von der Temperatur im Brandsystem dar, die Geraden (I;II;III;IV) die Geschwindigkeiten der konkurrierenden Wärmeableitung. Bei niedrigen Temperaturen vor einer Zündung, kann man davon ausgehen, daß Brennstoff und Luft mindestens in Übergangsbereichen Gemische bilden (Gas-/Luft- oder Dampf/Luft-Gemische) bzw. sich unmittelbar berühren. Unter dieser Bedingung kann die Reaktionsgeschwindigkeit und mit ihr die proportional abhängige Geschwindigkeit der Wärmeentwick-



- $\dot{Q}_{\text{frei}}$  : Geschwindigkeit der Wärmeentwicklung
- $\dot{Q}_{\text{ab}}$  : Geschwindigkeit der Wärmeableitung
- $T_B$  : Temperatur des Brandsystems
- A : stabiler Zustand, führt nicht zur Zündung
- B, C : instabile Zustände, führen zur Zündung
- $D_1 \dots D_4$  : stationärer Brand
- 1, 2, 3 : Wärmeentwicklung } als Funktion verschiedener
- I, II, III, IV : Wärmeableitung } Brandparameter

Bild 25: Stabilitätsdiagramm einer Verbrennung ( nach FRANK-KAMENETSKI, geändert)

lung mit wachsender Temperatur exponentiell zunehmen (Kurvenbereich A-C). Die Reaktionsgeschwindigkeit ist in diesem Bereich bestimmend für die Geschwindigkeit der Wärmeentwicklung. Ist nach einer Zündung (Punkt C) der Sauerstoff in der Reaktionszone verbraucht, muß für den Fortgang der Verbrennung weitere Luft zugeführt werden. Damit wird bei höheren Temperaturen die Transportgeschwindigkeit der Luft in die Reaktionszone für die Reaktionsgeschwindigkeit bzw. die Wärmeentwicklung bestimmend (siehe Abschnitt 3.1.1). Bei behinderter Luftzufuhr kann die Wärmeentwicklung nur mit einer der verminderten Reaktionsgeschwindigkeit angepaßten geringeren Geschwindigkeit steigen (Kurven 2 und 3).

Für die Wärmeableitung aus dem Brand gelten die in Abschnitt 5.2 erläuterten Gesetze der Wärmeübertragung. Für die interne Stabilität des Brandes wird nun wieder vereinfacht angenommen, daß die Geschwindigkeit der Wärmeabgabe linear mit der Temperatur zunimmt. Die Geraden I,II,III,IV stellen die Wärmeableitung bei von links nach rechts steigenden Anfangstemperaturen dar.

Im Bereich A-B verläuft die Wärmeentwicklungskurve flacher als die zugehörige Gerade für die Wärmeableitung. Würde in diesem Temperaturbereich eine Reaktion eingeleitet, so würde die Wärme immer schneller abgeleitet als erzeugt; das System bewegt sich wieder zum Punkt A zurück. Das System ist stabil; eine selbständig ablaufende Verbrennung ist nicht möglich.

Die Temperatur bei B kennzeichnet einen kritischen Punkt. Oberhalb dieser Temperatur wird die Wärmeentwicklung schneller als die Wärmeableitung. Bezogen auf die Gerade III, also bei höherer Anfangstemperatur, kann bereits eine Zündung erfolgen. Bezogen auf die Wärmeableitungsgerade II können Selbsterhitzungsprozesse einsetzen. In diesem Fall bezeichnet die Temperatur bei C den Punkt der Zündung. Bei mit steigender Temperatur flacher werdenden Wärmeentwicklungskurven nimmt das Gewicht der Wärmeableitung wieder zu. An den Schnittpunkten  $D_1$  bis  $D_4$  stellen sich quasistabile Zustände zwischen Wärmeentwicklung und Wärmeablei-

tung ein - die Brandtemperaturen -, die aber wegen der in diesem Bereich unvermeidlichen starken Schwankungen in Flammen bei Luftzufuhr, Vermischung mit Luft und Reaktionsgeschwindigkeit ebenfalls erheblichen Fluktuationen unterworfen sind.

Am besten läßt sich das Stabilitätsdiagramm der Verbrennung an einem stationär ablaufenden Glimmbrand reproduzieren. An einem solchen System läßt sich auch zeigen, daß eine steigende Umgebungstemperatur (etwa durch erhitzte Luft oder bei einem Wärmerestau) eine, wenn auch geringfügig steigende Brandtemperatur zur Folge hat (Bild 26). Umgekehrt führt eine Verringerung der Luftzufuhr, d.h. eine Verminderung der Sauerstoffkonzentration (Sauerstoffpartialdruck) zu einer infolge kleinerer Reaktionsgeschwindigkeit ebenfalls niedrigeren Brandtemperatur (nicht bezeichnete Schnittpunkte der gestrichelten Kurven mit den Wärmeableitungsgeraden in Bild 25). Es stellt sich also in einem Verbrennungssystem bei einem stationären Zustand eine jeweils charakteristische Temperatur ein.

Wegen der Strömungen in Gasen sind ausgedehnte Flammen natürlich noch wesentlich instabiler als Glut- oder Glimmprozesse an Feststoffen. In Flammen treten periodische Schwankungen auf, das typische Flackern. In den aus einer Flüssigkeit aufsteigenden Dampf bzw. in das aus Festkörpern durch Pyrolyse entwickelte Gasgemisch wird durch die Konvektion Luft in Wirbeln von der Seite her angesaugt. Es entstehen Bereiche mit zündfähigen Gasgemischen. Durch den Wärmerückstrom aus der Flamme oder durch direkte Flammenberührung (Wärmeleitung) wird das Brennstoff/Luftgemisch gezündet und vergrößert bei der Verbrennung sein Volumen bis um das vier- bis fünffache. Die expandierenden Verbrennungsgase drängen die Luft zurück, so daß vorübergehend keine Frischluft nachströmen kann. Erst wenn der abbrennende Flammenballen durch die Konvektion nach oben wegtransportiert wird, kann durch den Unterdruck wieder Luft angesaugt werden und sich erneut mit Brennstoff mischen. Die Periodizität des Vorgangs erzeugt das Flackern der Flammen (siehe z.B. Bild 9).

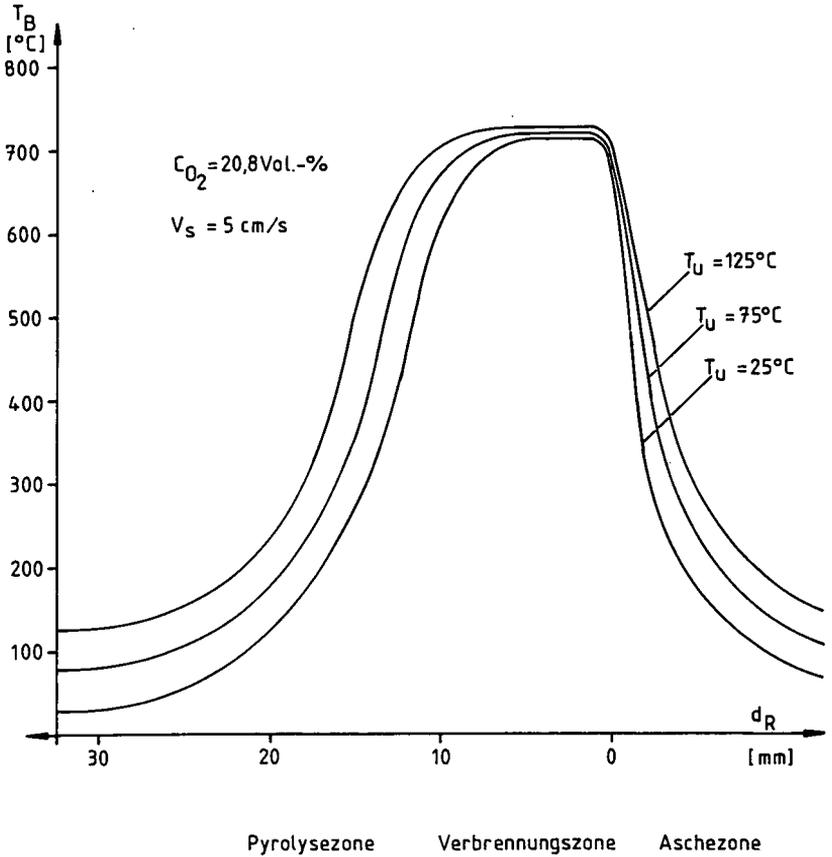


Bild 26: Temperaturverlauf in den Glimmzonen von Cellulosestäben bei verschiedenen Umgebungstemperaturen (siehe auch Bild 25)

#### 5.4 Temperatur und Lichtemission eines Brandes

Die Emission von Licht wird praktisch einhellig für ein Charakteristikum einer Verbrennung, eines Feuers und damit auch eines Brandes gehalten (HELMER, 1930; VOSSSEN, 1968; WÄLDER, 1971; DIN 14 011; DIN 50 060; usw.). Da das Erkennen der Emission sichtbarer Strahlung sowohl von der Intensität der Lichtemission aus einer Reaktionszone als auch von der Empfindlichkeit des menschlichen Auges abhängt, enthält dieser Problembereich noch einige nicht völlig geklärte Fragen.

Wie Bild 24 zeigt, hängt die Strahlungsenergie des "optisch" schwarzen Körpers und damit auch seine Strahlungsintensität von seiner Temperatur ab. Je höher die Temperatur ist, desto stärker wird auch die Strahlungsintensität im sichtbaren Bereich. Man kann aber deutlich erkennen, daß die Strahlungsenergie zum langwelligeren Ende des sichtbaren Bereichs ( $\approx 0,8 \mu\text{m}$ ), d.h. im roten Spektralbereich mit wachsender Temperatur stärker ansteigt als bei tieferer Temperatur, obwohl das Strahlungsmaximum sich zu kürzeren Wellenlängen verschiebt. Trotzdem wird die Lichtempfindung immer mehr zur Farbe weiß verschoben, je heißer ein Körper ist, d.h. je mehr die Farbzusammensetzung des ausgesendeten Spektrums der von unserem Auge adaptierten Mischung weiß der Spektralfarben (rot-gelb-blau) entspricht.

Dieser Sachverhalt wird mit der unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeit der Stäbchen und Zäpfchen in der Netzhaut des menschlichen Auges erklärt (THEWS/MUTSCHLER/VAUPEL, 1982). Die Stäbchen dienen als Rezeptoren für das Hell/Dunkel-Sehen (Dämmerungssehen, skotopisches Sehen), besitzen aber die größte spektrale Empfindlichkeit bei einer Wellenlänge von ca. 510 nm ( $= 0,51 \mu\text{m}$ ). Die farbempfindlichen Zäpfchen (Tageslichtsehen, photopisches Sehen) sind bei ca. 550 nm am empfindlichsten; der Empfindlichkeitsbereich der Zäpfchen ist zu größeren Wellenlängen hin verschoben. Im Bereich des roten Lichtes, zur benachbarten Infrarotstrahlung sind die Zäpfchen empfindlicher als die

Stäbchen.

Unabhängig davon nimmt die Empfindlichkeit des Auges im langwelligen (bei ca. 750 nm) und im kurzwelligen (bei ca. 400 nm) Spektralbereich extrem ab. Bei einer Verschiebung um nur 10 nm sinkt die Empfindlichkeit auf die Hälfte (LAU/LEO; 1948). Soll also im Übergangsbereich zum Infrarot elektromagnetische Strahlung noch als "Licht" empfangen werden, so muß die Intensität dieser Strahlung entsprechend gesteigert werden, und die kürzeren Wellenlängen, auf die das Auge empfindlicher reagiert, müssen herausgefiltert werden. Andererseits sind sowohl Stäbchen als auch Zäpfchen imstande, bei länger andauernder Adaption noch sehr schwache Lichtreize wahrzunehmen (GRIFFIN/HUBBARD/WALD, 1947; LAU/LEO, 1948). CZERNY (1949) und BRÜGEL (o.J.) stellten sich auf den Standpunkt, daß das Auge als Hohlraumstrahler bei **Körpertemperatur** (also bei 37 °C) einfallende elektromagnetische Strahlung keinesfalls mehr als Lichtreiz empfinden dürfe.

Anhand der in Abschnitt 5.3 abgeleiteten Stabilitätsbedingungen für Verbrennungsprozesse kann man zeigen, daß eine ausreichende Verbrennungsgeschwindigkeit in Flammen eine Mindesttemperatur von ca. 1000 °C erfordert (JOST/WAGNER, 1965). Flammen sind also bei einem Brand wegen der Strahlung der in ihnen enthaltenen glühenden Rußpartikel (optisch graue Strahler) immer sichtbar. Flammen mit reiner Gasstrahlung, deren Strahlungsemission überwiegend im nicht sichtbaren Bereich liegt und deren sichtbare Strahlungsanteile von hellem Tageslicht überstrahlt werden können (z.B. kleine Alkoholflammen) sind für Brände völlig untypisch.

Verbrennungsprozesse an Festkörpern können stationär und stabil bei wesentlich niedrigeren Temperaturen ablaufen als in Flammen. Pyrolyseprozesse, die in Holz und anderen cellulosehaltigen Stoffen bereits oberhalb ca. 120 °C beginnen (für thermisch empfindliche Kunststoffe dürften ähnliche Werte gelten), über-

lagern sich in vielfältiger Weise mit beginnenden Oxidationsreaktionen. Wie in Abschnitt 3.2 gezeigt wurde, geht ein bereits bei vermindertem Sauerstoffgehalt mögliches Schwelen bei Erhöhung der Sauerstoffkonzentration praktisch kontinuierlich in ein Glimmen über, das durch deutliche Lichtemission gekennzeichnet ist. Es ist daher sowohl aus optischen, als auch aus reaktionskinetischen Gründen praktisch nicht möglich, eine wissenschaftlich begründete Temperaturgrenze festzulegen, unterhalb derer thermische Prozesse keine Strahlung mehr im sichtbaren Bereich emittieren.

In solchen Fällen ist es zweckmäßig und üblich, sich mit einer Festlegung zu behelfen. Eigene (KOHLHAAS, 1982; HÖLEMANN, 1984; RAUSSERT, 1984) und andere (PRAGER, 1985) experimentelle Erfahrungen haben gezeigt, daß vor allem in porösen Materialien mit schlechter Wärmeleitfähigkeit autonome Brandprozesse bei etwa 400 °C beginnen können und oberhalb dieser Temperatur eine selbständige Brandausbreitung möglich ist. Auch aus optischen Gründen scheint dieser Wert sinnvoll zu sein. Tabelle 6 zeigt, daß bei 400 °C an technisch wichtigen heißen Stoffen eine "schwach unbestimmte Grauglut" wahrnehmbar ist (VON SCHWARTZ, 1964; Lexikon der Physik).

Von diesen Überlegungen unberührt bleiben natürlich die in der Natur vorkommenden Prozesse, bei denen ohne (oder wenigstens ohne wesentliche) Temperaturerhöhung Licht emittiert wird, z.B. die Strahlung einer Leuchtstofflampe, das bei einigen chemischen Reaktionen auftretende kalte Leuchten (Chemolumineszenz) usw.. Solche Vorgänge haben mit einem Feuer und daher auch mit einem Brand nichts zu tun.

Glutfarbe	T [°C]
Schwach unbestimmte Grauglut	400
Erste wahrnehmbare Dunkelrotglut	525
Dunkle Rotglut	700
Helle Rotglut	900
Gelbe Glut	1100
Beginnende Weißglut	1300
Blendende Weißglut	1500

Tabelle 6: Glutfarben von Stahl und Eisen

## 6 Ausbreitung des Brandes

### 6.1 Ausbreitung "aus eigener Kraft"

Ein Brand wird im Vergleich zum Nutzfeuer vor allem durch die Eigenschaft charakterisiert, daß er sich außerhalb der von Menschen durch technische Maßnahmen gesetzten Begrenzungen ausbreitet<sup>\*)</sup>. Die AFB sprechen von Ausbreitung "aus eigener Kraft"; im brandschutztechnischen Sprachgebrauch hat sich mehr die Terminologie "unkontrollierte Ausbreitung" durchgesetzt (DIN 14011, Teil 1; DIN 50060).

Nun ist der Ausdruck Kraft im AFB-Begriff nicht unproblematisch. In der Physik beschreibt eine Kraft mechanische Wirkungen auf Gegenstände; Körper werden durch Kräfte beschleunigt oder abgebremst. In der Energietechnik werden die Begriffe Kraft und Energie aus traditionellen Gründen häufig (aber physikalisch nicht korrekt) gleichgesetzt. Man spricht von Kernkraftwerk, obwohl es richtiger Kernenergiewerk heißen müßte. Der letztere Begriff wäre aber völlig praxisfremd. Die Terminologie "unkontrollierte Ausbreitung" in der Brandschutztechnik geht weniger auf die energetischen Aspekte ein, enthält aber implizit Komponenten aus den anderen Merkmalen des AFB-Begriffs: Brand als Feuer, "das seinen bestimmungsmäßigen Herd verlassen hat oder ohne ihn entstanden ist ...".

Im Brandschutzwesen wird die Zündung und Ausbreitung eines Brandes oft durch ein sehr einfaches Schema, das Feuerdreieck oder Feuertetraeder nach EMMONS dargestellt (Bild 27). Eine Zündung bzw. ein Verbrennungsvorgang erfordert immer die Wechsel-

---

\*) Nach der in Naturwissenschaft und Technik gebräuchlichen Methodologie darf daraus nicht der Umkehrschluß gezogen werden, daß ein sich nicht ausbreitendes Feuer kein Brand sein kann.

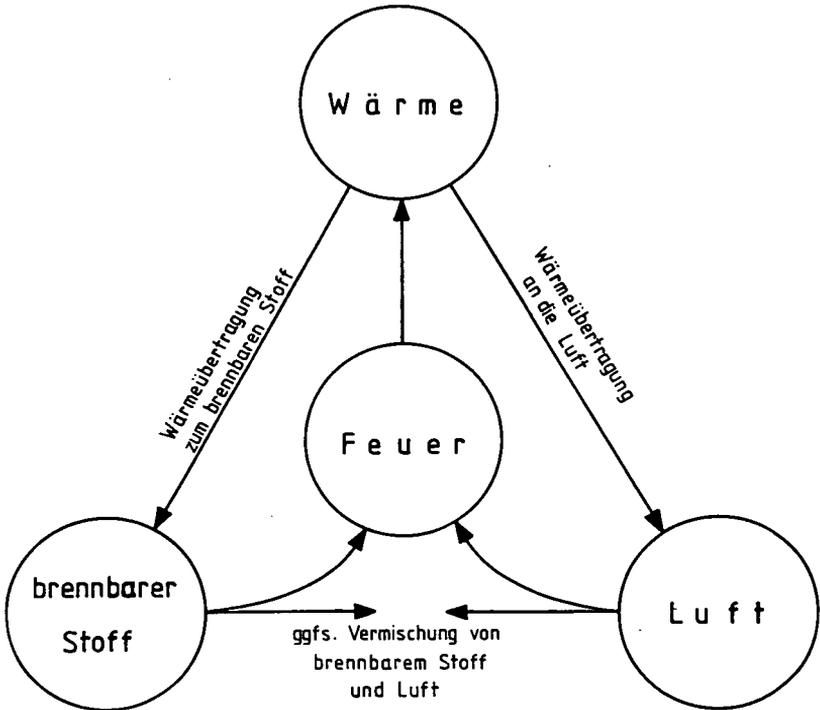


Bild 27: Feuertreieck bzw. Feuertetraeder (nach EMMONS)

wirkung zwischen brennbarem Stoff, Luft oder Sauerstoff und Zündenergie bzw. Wärme. Das Feuer kann nicht gezündet werden bzw. muß erlöschen, wenn eine der drei Komponenten entfernt oder (symbolisch) einer der Verbindungspfeile unterbrochen wird.

Die Ausbreitung eines Brandes läßt sich energetisch auch anhand des Stabilitätsdiagramms der Verbrennung in Bild 25 erklären: Aus der durch thermisches Gleichgewicht gekennzeichneten Verbrennungszone (Punkte  $D_1$  bis  $D_4$ ) wird Wärme an noch nicht brennendes Material <sup>1</sup> nach den bereits besprochenen Mechanismen abgegeben. Wird der brennbare Stoff mindestens auf eine zum Punkt C gehörende Temperatur erhitzt (Pfeil  $D_2-C$ ), erfolgt spontane Zündung. Da das neu gezündete Material die Wärme wieder <sup>2</sup> schneller produziert als Wärme an die Umgebung abgeführt wird, setzt sich die Verbrennung fort.

In Bild 13 ist das Fortschreiten einer Glimmfront durch Wärmeübertragung auf noch nicht pyrolysiertes Material dargestellt, in Bild 28 die Flammenausbreitung an einer senkrechten Wand. Durch die Konvektion und damit letztlich durch die Schwerkraft ist die bevorzugte Ausbreitungsrichtung der Flammen von unten nach oben vorgegeben.

Beide Modelle - das Feuerdreieck und das Stabilitätsdiagramm - gelten jedoch unabhängig davon, ob es sich um eine technische Verbrennung oder um ein Schadenfeuer handelt. Vom Aspekt der Verbrennung aus ist es gleichgültig, ob die Verbrennungszone einen festen Standort hat und der Brennstoff sich durch die Reaktionszone bewegt (wie bei einer Feuerungsanlage) oder ob sich die Front des Feuers in bisher noch nicht entzündetes Material ausbreitet. In beiden Fällen bewegen sich brennbares Material und Verbrennungsfront relativ zueinander. Daß das Geschwindigkeitsspektrum sehr breit sein kann (Bruchteile von mm/min bei einem Glimmbrand bis zu m/sec bei stark turbulenten Flammen) ist in diesem Zusammenhang unerheblich. Die Ausbreitung aus eigener Kraft ist von diesem Standpunkt aus keine spezi-

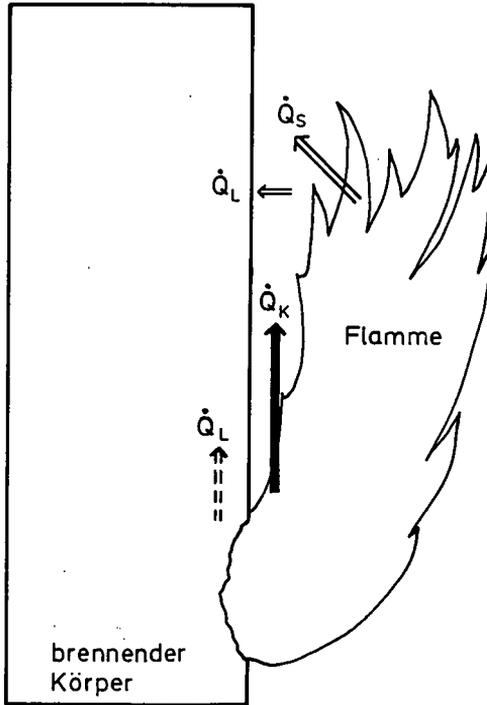


Bild 28: Flammenausbreitung mit Wärmeübertragung an einer senkrechten Wand, schematisch

fische Eigenschaft eines Brandes, sondern Merkmal jeder autonomen Verbrennung.

Mit der AFB-Definition soll aber auch ausgedrückt werden, ob sich ein Feuer über den ursprünglichen räumlichen Wirkungsbereich einer Zündquelle hinaus ausbreiten kann. In eine Hose oder in einen Sessel durch Zigaretten gebrannte Löcher werden heute nicht mehr als Brandschäden anerkannt (siehe dazu HELMER, 1930), sofern sich daraus kein ausgedehnterer Brand entwickelt. Das Feuer hat in diesen Fällen nicht die Kraft, um sich auszubreiten. Die Diskussion, ob solche Fälle bereits durch die "Sengschäden-Klausel" von der Ersatzpflicht ausgeschlossen sind oder ob ein kurzzeitiges Glimmen, das selbständig wieder erlischt, aus systematischen Gründen als Feuer bezeichnet werden muß, soll hier nicht wieder aufgenommen werden.

Im folgenden wird kurz zusammengefaßt auf die Parameter eingegangen, die die Zündung und Ausbreitung eines Brandes bestimmen.

## **6.2 Parameter für Zündung und Ausbreitung**

### **6.2.1 Materialeigenschaften**

Obwohl zwischen technischer Verbrennung und Brand bezüglich der generellen Ausbreitungsmechanismen kein grundsätzlicher Unterschied besteht, so führen doch die Bedingungen, unter denen die Verbrennung jeweils stattfindet, zu verschiedenen wissenschaftlichen Fragestellungen und Bearbeitungsmethoden. Flammen in Feuerungsanlagen werden hauptsächlich daraufhin untersucht, mit welchen Methoden sich die Energieausbeute steigern und der Schadstoffausstoß verringern läßt. Also stehen Optimierungskriterien im Vordergrund. Der Abbrand von Flüssigkeiten aus Tanks in sog. auftriebsbehafteten Diffusionsflammen (BRÜTZ/SCHÖNBUCHER et al, 1985) - eine Verbrennungsform, die sich von der Verbrennung in einem Ölbrenner grundsätzlich unterscheidet - findet erst neuerdings im Zusammenhang mit sicherheitswissenschaftlichen Frage-

stellungen (Tankabstände etc.) stärkere Beachtung.

Da Brände zwar zufallsbedingte (stochastische) Prozesse sind, aber bestimmte Bedingungen für Entstehung und Ausbreitung vorfinden müssen, sind die dafür erforderlichen **Randbedingungen** von besonderem sicherheitswissenschaftlichem aber auch versicherungstechnischem Interesse. Zündung und Verbrennung hängen von weitgehend analogen Stoffeigenschaften ab und werden hier gemeinsam betrachtet.

Wie aus den bisherigen Ausführungen bereits hervorgeht, sind Entzündbarkeit und Brennbarkeit von Stoffen als Funktion der chemischen Eigenschaften abhängig

a) von der Fähigkeit der Stoffe mit Sauerstoff (oder mit einem anderen Oxidationsmittel) exotherm zu reagieren (ausgedrückt durch die Reaktionsenthalpie)

und

b) von dem sich einstellenden Gleichgewicht zwischen Wärmeentwicklung- (abhängig von der Reaktionsgeschwindigkeit) und Wärmeableitungsgeschwindigkeit.

Eine leichtere (oder erschwerte) Zündung ist vor allem feststellbar:

a) an einer Vergrößerung (Verkleinerung) des Zündbereiches bei Gasen, Dämpfen, Nebeln oder aufgewirbelten Stäuben (Staubwolken) bzw. einer Verminderung (Erhöhung) der für eine Zündung an festen Stoffen erforderlichen Sauerstoffkonzentration (besser: Sauerstoffpartialdruck);

b) an einer Verminderung (Erhöhung) der erforderlichen Zündenergie.

Dagegen ist die Zündtemperatur nur bedingt geeignet um festzustellen, ob ein Stoffsystem schwerer oder leichter zündbar ist. Gase und Dämpfe besitzen i.a. eine höhere Zündtemperatur als feste oder poröse Stoffe.

Eine Steigerung (Verminderung) der Brennbarkeit, oder beim

stationären Brand, der Verbrennungsintensität, läßt sich abschätzen an:

- a) einer Erhöhung (Verminderung) der Brandbelastung;
- b) einer Erhöhung (Erniedrigung) der Flammen- oder Gluttemperaturen;
- c) einer Vergrößerung (Verringerung) der Ausbreitungs- oder Verbrennungsgeschwindigkeit (Strecke/Zeit; Masse/Zeit);
- d) einer Vergrößerung (Verkleinerung) der Wärmefreisetzungs-geschwindigkeit.

Die Brandbelastung läßt sich zwar am einfachsten und außerdem recht genau bestimmen, zur Abschätzung eines Brandszenarios sind aber auch die anderen Faktoren unerlässlich.

Die Zündbarkeit und Brennbarkeit hängt i.w. ab:

- a) von der chemischen Zusammensetzung der Materialien;
- b) von Beimengungen, insbesondere vom Feuchtigkeitsgehalt;
- c) von ihrem Verteilungsgrad und Aggregatzustand;
- d) von ihrer spezifischen Wärme, Dichte und Wärmeleitfähigkeit;
- e) von ihrer Temperatur bzw. thermischen Vorbehandlung;
- f) von der Sauerstoffkonzentration, bzw. der in die Zünd- oder Brandzone je Zeiteinheit gelangenden Sauerstoffmenge (Ventilation);
- g) von der geometrischen Anordnung, aber auch der Faserrichtung bei anisotropen Stoffen, z.B. Holz;
- h) vom Verbund mit anderen Stoffen sowie vom Einbauzustand;
- i) unabhängig von der originären chemischen Zusammensetzung von chemischen Zusätzen, die die Brennbarkeit und Entzündbarkeit stark beeinflussen.

Die Aufzählung zeigt, daß die Kombinationsmöglichkeiten der verschiedenen Parameter nahezu unermesslich groß sind. Eine Zusammenfassung der Wirkungen einiger Einflüsse geben PRAGER (1985) und andere Autoren.

Stoffeigenschaften lassen sich nur für wenige Systeme unter definierten Bedingungen festlegen, z.B. die Zünd- oder Explosionsbereiche brennbarer Gase und Dämpfe im Gemisch mit Luft. Beispiele

sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Bei der in der linken Spalte angegebenen Konzentration der Brennstoffe in Luft (bezogen auf ca. 20 °C, atmosphärischen Druck und homogene Mischung), der Unteren Explosions- oder Zündgrenze (UEG, UZG) ist gerade noch keine Zündung bzw. Flammenausbreitung im Gemisch möglich (zu mageres Gemisch). Bei dem Grenzwert in der rechten Spalte ist gerade keine Zündung oder Flammenausbreitung im Gemisch mehr möglich (Obere Explosionsgrenze, OEG; Obere Zündgrenze, OZG). Zwischen beiden Grenzwerten befindet sich der Zündbereich. In zu fetten Mischungen oberhalb der Oberen Zündgrenze kann sich eine Flamme zwar nicht mehr ausbreiten, in offenen Systemen (z.B. einem offenen Behälter) ist aber im Übergangsbereich zu Luft eine Entflammung möglich.

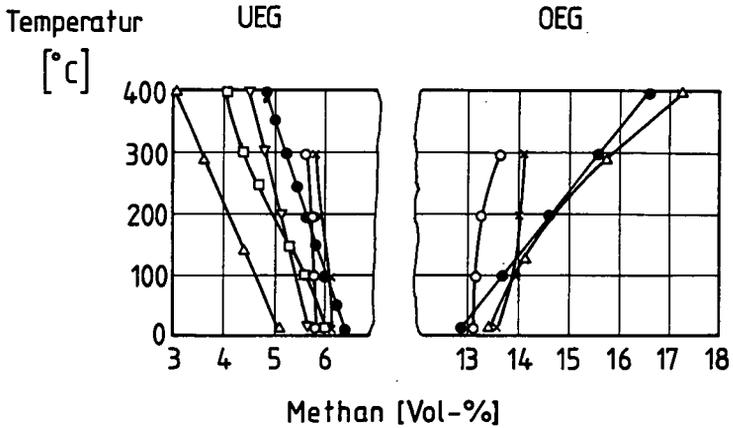
Die angegebenen Werte gelten nur bei Raumtemperatur. Bild 29 zeigt in diesem Zusammenhang am Beispiel des Zündbereiches von Methan/Luft-Gemischen zweierlei:

- 1) Die Werte mehrerer Autoren weichen wegen verschiedener Versuchsbedingungen und Beobachtungsmethoden durchaus voneinander ab.
- 2) Der Zündbereich erweitert sich mit wachsender Temperatur sowohl an der UZG als auch an der OZG. Erwärmte Gemische werden also leichter gezündet.

Für komplexer zusammengesetzte Systeme lassen sich so einfache Zusammenhänge nicht mehr angeben. Dies gilt vor allem für feste Materialien. Hier ist die Eigenschaft **entzündbar** oder **brennbar** auf präzise vorgegebene Versuchs- oder Prüfbedingungen bezogen, und man spricht in diesen Fällen von Realdefinitionen. Ein Beispiel ist die Prüfung des Brandverhaltens von Baustoffen nach DIN 4102, Teil 1. Die Baustoffe werden nach den Ergebnissen der Prüfungen in nicht brennbare (Klassen A1 und A2) sowie in brennbare Baustoffe eingeteilt, letztere in schwerentflammbare (Klasse B1), normalentflammbare (Klasse B2) und leichtentflammbare Baustoffe (Klasse B3). In der Norm heißt es dazu: "Die Kurzzeichen und Benennungen dürfen nur dann verwendet

STOFF	EXPLOSIONSGRENZEN bei 20°C und 1013 mbar	
	UEG [Vol%]	OEG [Vol%]
Aceton	2,5	13,0
Acetylen (Ethin)	2,2	82,0
Ammoniak	15,0	28,0
Benzol	1,2	8,0
n - Butan	1,5	8,5
Cyclohexan	1,2	8,3
Dimethylether	2,0	27,0
Ethan	3,0	15,5
Ethanol	3,5	15,5
Ethylen (Ethen)	2,7	34,0
n - Hexan	1,2	7,4
Kohlenmonoxid	12,5	74,0
Methan	5,0	15,0
Methanol	5,5	40,0
n - Pentan	1,4	7,8
Propan	2,1	9,5
Schwefelkohlenstoff	1,0	60,0
Toluol	1,2	7,0
Wasserstoff	4,0	75,6
o - Xylol	1,0	7,6

Tabelle 7: Zündgrenzen bzw. Explosionsgrenzen brennbarer Gase und Dämpfe im Gemisch mit Luft (Werte i.w. nach FREYTAG)



- Roszkowski
- × Berl und Fischer
- White
- Mason und Wheeler
- ▽ Burell und Robertson
- △ Kwiatkowski

Bild 29: Erweiterung des Zündbereichs von Methan/Luft-Gemischen mit steigender Temperatur (Werte nach KWIATKOWSKY)

werden, wenn das Brandverhalten nach dieser Norm ermittelt worden ist".

Das Entzündungs- und Brandverhalten von Baustoffen ist daher auch komplexer, als in den Bezeichnungen ausgedrückt werden kann. Bei nicht brennbaren Baustoffen wird geprüft, ob bei Erhitzung auf  $750^{\circ}\text{C}$  - wenn auch nur sehr geringfügig - Wärme freigesetzt wird und sich brennbare Gase entwickeln. Bei brennbaren Baustoffen untersucht man das Entzündungsverhalten bei der Einwirkung unterschiedlicher Gasflammen (Simulation eines brennenden Papierkorbes bzw. einer Streichholzflamme).

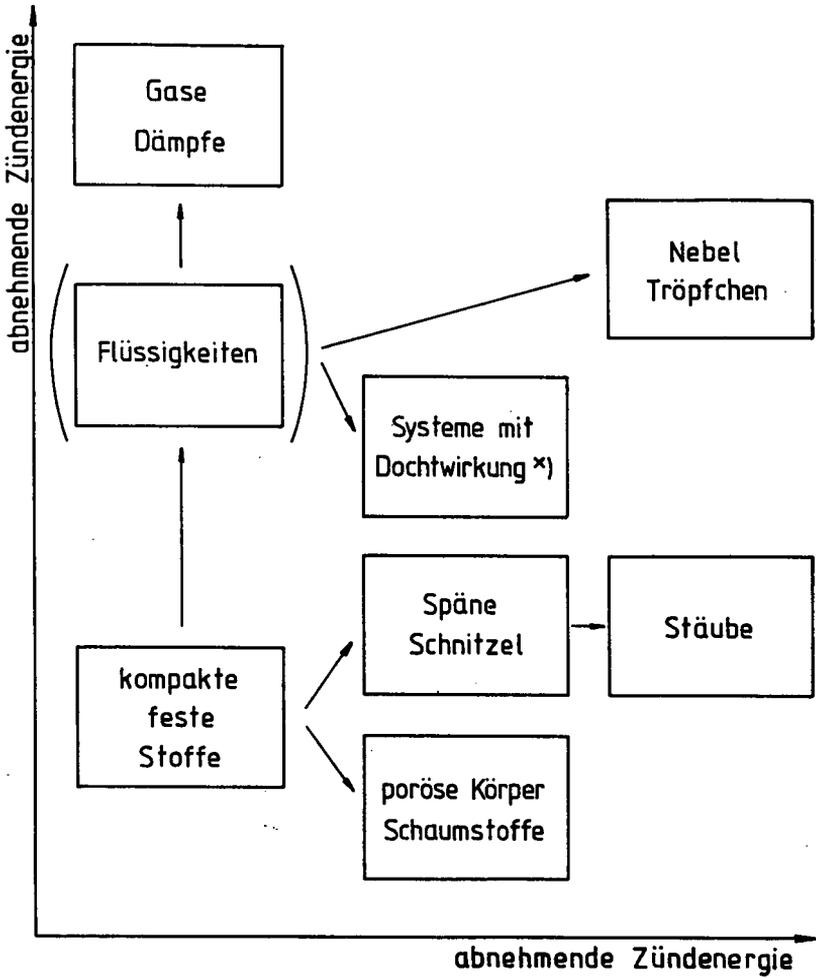
Für viele Systeme gibt es weder geeignete Kennwerte noch Realdefinitionen von Begriffen. In diesen Fällen ist man auf qualitative und vergleichende Betrachtungen angewiesen, um das Ausbreitungsverhalten eines Brandes abzuschätzen. Bild 30 zeigt anhand einer schematischen Darstellung, wie mit zunehmendem Verteilungsgrad von Stoffen generell auch die Zündbarkeit erleichtert und die Brennbarkeit erhöht wird.

Es ist also neben naturwissenschaftlichen und technischen Kenntnissen auch ein großes empirisches Wissen erforderlich, um zu prognostizieren, ob und unter welchen Bedingungen in einem Bereich eine Brandausbreitung möglich erscheint, und nach einem Ereignis zu klären, wie der Brand entstehen und sich ausbreiten konnte.

### 6.2.2 Zündquellen

Auf eine systematische Erörterung von Zündquellen, die einen Brand außerhalb eines bestimmungsmäßigen Herdes auslösen können, wird hier verzichtet. Hingewiesen werden soll hier nur auf einige der wichtigsten Zündursachen:

Schweißen, thermisches Schneiden sowie entsprechende feuergefährliche Arbeiten vor allem bei Bau-, Demontage- und Reparatur-



\*) Flüssigkeitsfilme  
auf Trägermaterialien

Bild 30: Einfluß eines zunehmenden Verteilungsgrades auf die Zündbarkeit und Brennbarkeit von Stoffen

arbeiten (HÖLEMANN/WORPENBERG, 1986); elektrische Anlagen; glimmende Tabakwaren sowie durch Selbsterhitzungsprozesse und andere thermische Ursachen erzeugte Glimmester; Blitzschlag; elektrostatische Entladungen; offene Flammen; heiße Oberflächen.

Nicht nur die Zündenergie (und ggfs. auch die Temperatur) in Relation zu den Stoffeigenschaften sind für den "Erfolg" einer Zündung entscheidend, sondern auch die Art des Angriffs der Zündquelle am brennbaren Material. Dies gilt vor allem für kleine, näherungsweise punktförmige Zündquellen.

So ist es äußerst schwierig, ein Blatt Papier durch die Glut einer Zigarette zur Entzündung zu bringen. Es entsteht ein Loch mit einem äußerstenfalls glimmenden Rand. Das Papier weicht vor dem Glutkegel der Zigarette zurück (POHL, 1981). Entsprechendes ereignet sich meistens, wenn Textilien durch glimmende Tabakwaren beschädigt werden. Es existieren aber zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen über die Frage, unter welchen geometrischen Bedingungen der Glutkegel einer Zigarette vor allem auf Textilien einwirken muß, um eine Zündung zu begünstigen (Zusammenfassung bei KREIS, 1986).

Eigene Untersuchungen mit glühenden Partikeln, die von Schweißstäben abgeschmolzen wurden, zeigten entsprechende Befunde an massiven Holzproben (siehe Bild 31). Eine Zündung erfolgte z.B. nicht, wenn die Partikel in Astlöchern nachgebildeten Bohrungen oder in Spalten appliziert wurden. Das primär entstehende Flämmchen aus dem Pyrolysegas, das durch das Partikel erzeugt und an seiner glühenden Oberfläche sofort entzündet wurde, konnte oberhalb der Zündstelle nicht genug Material erhitzen. Die Flämmchen erloschen nach kurzer Zeit. Eine Zündung erfolgte jedoch (auch in Abhängigkeit von den sonstigen Eigenschaften der Holzproben), wenn

- 1) die Berührungsfläche des Partikels mit der Holzprobe groß genug war,
- 2) die Ventilation in den aneinanderstoßenden horizontalen und

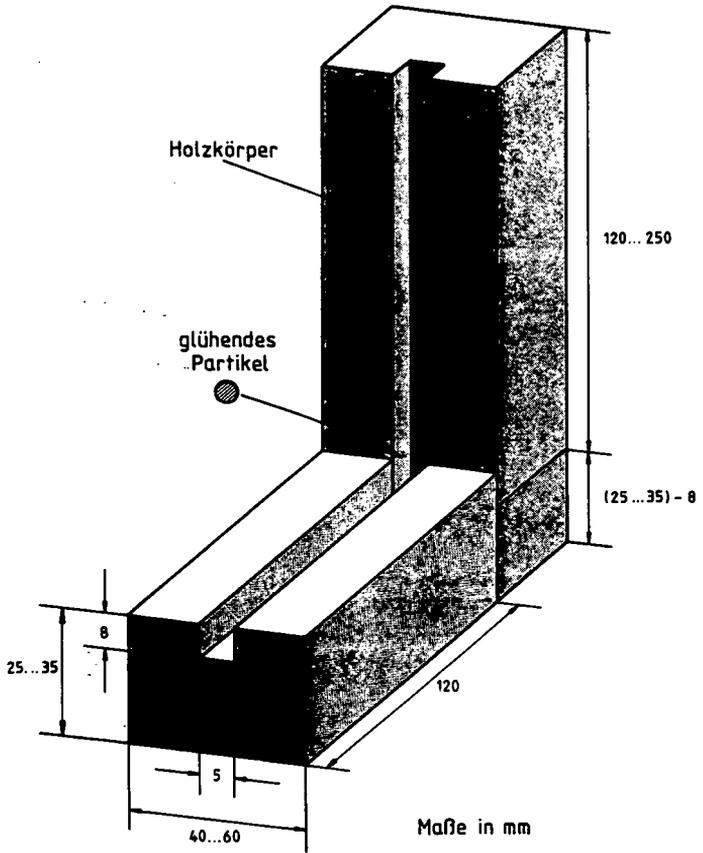


Bild 31: Zündung von Probekörpern aus Holz durch glühende Partikel, Einfluß der "Zündgeometrie" (nach HÖLEMANN et al.)

vertikalen Spalten ausreichte  
und

- 3) genügend Material oberhalb der primären Zündstelle durch die Konvektion der heißen Gase erhitzt wurde (HÜLEMANN et al, 1987).

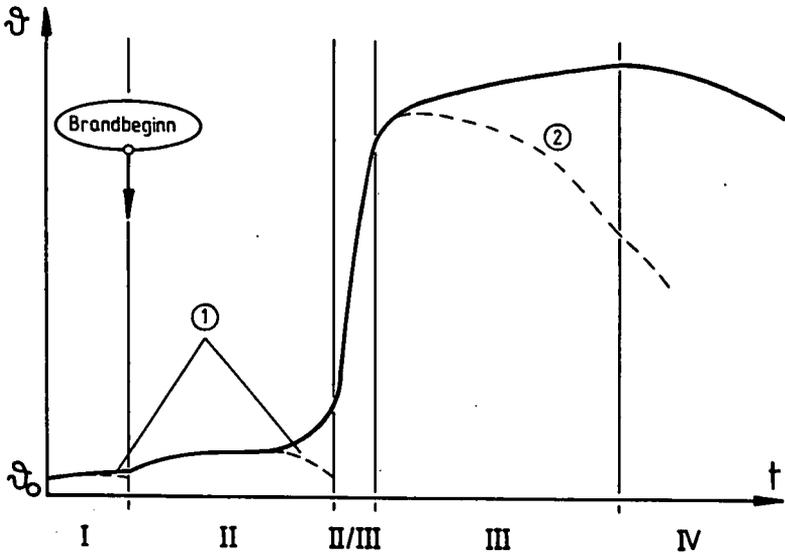
Die Beispiele zeigen, daß neben der Zündenergie der Zündquelle sonstige und für viele Einzelfälle gesondert zu betrachtende Wechselwirkungen bei einer Zündung entscheidend sind.

### 6.3 Brandszenarien

Um in der großen Vielfalt einen Überblick zu gewinnen, werden für Untersuchungen in Anlehnung an die Praxis Szenarien aufgebaut (z.B. Wohnräume mit Einrichtungen, Dachkonstruktionen, Gebäudefassaden) und daran die Brandausbreitung einschließlich der maßgeblichen Parameter (Materialkombinationen, Brandbelastung und ihre Verteilung, Raumgeometrie, Ventilation usw.) studiert. Auch an Modellen in kleinerem Maßstab lassen sich Brände größerer Ausdehnung simulieren. Schließlich hat man durch Wärmebilanzrechnungen die Ergebnisse der Brandversuche in kleinen Räumen auf große Räume bis hin zu Fabrikhallen übertragen (SCHNEIDER, 1980).

Derartige Versuche interessierten vor allem auch unter dem Aspekt der Gefährdungen und des Schutzes von Personen (PRAGER, 1985).

Das bereits am längsten bekannte, sowohl aus praktischen Erfahrungen und mit Hilfe von Versuchen entwickelte und immer wieder modifizierte Modell, das man auch als verallgemeinertes Brandszenario betrachten kann (siehe z.B. DRYSDAYLE, 1980), beschreibt schematisch die Entstehung und Ausbreitung eines Brandes in einem Raum anhand einer Einteilung in zeitliche Phasen. Die Entwicklung der mittleren Raumtemperatur während der Branddauer zeigt Bild 32a. Das dazugehörige Schema 32b liefert einen Überblick über die Brandparameter. Zeit- und Temperatur-



Erläuterungen :

$\bar{\vartheta}$  : Mittlere Raumtemperatur  
 $\vartheta_0$  : Raumtemperatur vor dem Brand  
 $t$  : Zeit

Brandphasen : I Zündung  
II Entstehungsbrand  
(Schwelbrand, Pre-flashover-Phase  
häufig : lokal begrenzter Brand)  
II/III Flash-over, Feuerübersprung  
III Vollentwickelter Brand  
IV Abklingender Brand

① ② Temperaturabfall bei eventuellem Selbstverlö-  
schen bzw. bei Löschmaßnahmen

Bild 32a: Zeitliche Entwicklung der Temperatur bei einem  
Raumbrand, schematisch

Zeit t →

Phase Vor dem Brand	Phase I Zündung	Phase II Entstehungsbrand (Schwelbrand)	Phase II/III Flash- over	Phase III Vollentwickelter, offener Brand	Phase IV Abklingender Brand
latente oder zeitweilige Anwesenheit von Zündquellen	Wirksam- werden einer Zündquelle (Übertragung der Zündenergie); Entflammung; ggfs. Selbst- entzündung.	Entwicklung und Ausbreitung von Wärme: Anstieg der Temperatur; Hitzeinwirkung auf brennbare und nichtbrennbare Stoffe- und Gegenstände			Nachlassen der Wärmeentwicklung, Abklingen der Temperatur
		Leicht-, normal- und schwerentflammbare Stoffe beginnen nacheinander zu brennen (Zündkette); Flammenausbreitung meist auf der Oberfläche; ther- mische Aufbereitung von Stoffen (Schwelvevorgänge, Pyrolyse).	Schlagarti- ge Aus- breitung des Brandes auf den gesamten Raum.		Brennbare Stoffe sind weitgehend verbrannt.
Anwesenheit von brennbaren bzw. zündbaren Lagergütern, Werkstoffen, Baustoffen.	Entwicklung und Ausbreitung von Rauch; Reizwirkung, Toxizität, Korrosivität, Verrauchung, Verrußung				Nachlassen der Rauchentwicklung

Schema 32b: Zusammenstellung der Parameter, die den Brand in einem Raum beeinflussen

skala sowie die relative Dauer der einzelnen Brandphasen in diesem Diagramm können nicht maßstabsgerecht sein, sondern sollen nur einen der Erfahrung entsprechenden Eindruck vermitteln.

Besonders wichtig für die Entwicklung eines Brandes und für seine Folgen ist der immer wieder beobachtete Feuerübersprung oder Flash-over, d.h. die innerhalb sehr kurzer Zeit (Sekunden bis wenige Minuten) erfolgende, schlagartige Ausbreitung eines vorher lokal begrenzten Brandes auf große Raumbereiche oder den ganzen Raum. Die Konzentration der während des Entstehungsbrandes gebildeten brennbaren Pyrolysegase erreicht bei langsam ansteigender Raumtemperatur plötzlich den Zündbereich in einem größeren Raumbezirk. Es tritt Entflammung ein. Die Flammenturbulenz und die dadurch verstärkte Konvektion mit vermehrter Luftzufuhr sowie die raschere Pyrolyse und Ausgasung bereits erhitzter, thermisch aufbereiteter Materialien fördern die Resanz des Feuerübersprungs. Viele Vorgänge beim Feuerübersprung sind noch nicht ausreichend geklärt.

Auf die bei solchen Untersuchungen auch immer wichtige Ausbreitung von Rauch und toxischen bzw. korrosiven Gasen, auf besondere Ausbreitungsmechanismen bei Großbränden (KORDINA/KRAMPF, 1982; KRAMPF, 1984), bei ausgedehnten Flächen- oder Waldbränden (ESSER, 1985) und auf die mit gewaltigen Luftmassenbewegungen verbundenen Brandausweitungen - die sog. Feuerstürme (BESSON, 1960; BRUNSWIG, 1983) - kann hier nur hingewiesen werden.

## **7 Sonderprobleme**

### **7.1 Sengschäden**

Auf die in der Literatur ausführlich beschriebenen Sengschäden (HELMER, 1930), die vom Versicherungsschutz ausgeschlossen sind, wurde bereits mehrfach eingegangen. Es handelt sich in den meisten Fällen um endotherme Pyrolyseprozesse, die nicht zu einer Zündung führen können oder um exotherme Pyrolyseprozesse, bei denen die sonstigen Bedingungen nicht zur Auslösung einer autonomen Verbrennung ausreichen (siehe Kapitel 5 und 6).

Auch Selbsterhitzungsvorgänge, die keine Zündung bewirken, werden im weiteren Sinne zu den Sengschäden gerechnet. Die Grenze zu einer autonomen Verbrennung und damit zu einem Brand ist nicht immer leicht zu ziehen, wie aus den Darlegungen in Abschnitt 5.4 hervorgeht.

Sengschäden, die durch einen Brand verursacht werden, sind vom Versicherungsschutz zweifelsfrei erfaßt (FALCKENBERG, 1973; WUSSOW, 1975; HERDT, 1978; MARTIN, 1986; PRÖLSS/MARTIN, 1988). Solche Sengschäden beruhen i.a. auf Pyrolyseprozessen durch Wärmeübertragung auf größere Entfernungen, also vorwiegend durch Konvektion und Wärmestrahlung. Thermische Fernwirkungen können sehr intensiv sein und zur Zündung weiterer Gegenstände in großem Abstand vom primären Brandbereich führen.

### **7.2 Betriebsschäden**

Nach § 1 Absatz 2 AFB (alter Fassung) sind "Schäden, die an den versicherten Sachen dadurch entstehen, daß sie einem Nutzfeuer oder der Wärme zur Bearbeitung oder zu sonstigen Zwecken (z.B. zum Räuchern, Rösten, Kochen, Braten, Trocknen, Plätten) ausgesetzt werden" vom Versicherungsschutz ausgeschlossen. Die in den AFB 87 gewählte Formulierung für den Ausschluß dieser sog.

Betriebsschäden ist auf S. 3 wiedergegeben. Die Neufassung soll die Klärung von häufiger auftretenden Zweifelsfragen erleichtern.

Der Betriebsschadenklausel liegt die Überlegung zugrunde, daß Gegenstände, auf die betriebsmäßig ein Nutzfeuer oder eine Wärmequelle einwirkt, einem erhöhten, für den Versicherer nicht kalkulierbaren Brandrisiko ausgesetzt sind und daher nicht unter den Versicherungsschutz fallen können. Für Brandschäden an solchen Gegenständen stellt der Begriff **Betriebsschaden** eine zwar griffige und deshalb allgemein gebräuchliche, aber nicht ganz zutreffende Sammelbezeichnung dar. Es sind keineswegs nur Erhitzungsvorgänge im gewerblichen Bereich gemeint, sondern der Begriff wird allgemein für Brandschäden verwendet, die durch unmittelbare Wärmeeinwirkung auf Gegenstände beim Betreiben eines beliebigen Nutzfeuers oder einer Wärmequelle entstehen (RAISER, 1937; FALCKENBERG, 1973; HERDT, 1978; MEYER-KAHLEN, 1981; MARTIN, 1986; PRÖLSS/MARTIN, 1988).

Mit ausschließlich naturwissenschaftlichen Betrachtungen läßt sich zwischen "echten" Brandschäden und Betriebsschäden zunächst nicht differenzieren. Physikalisch oder chemisch besteht zwischen Wärmeeinwirkungen durch einen Brand bzw. Wärmeeinwirkungen durch ein Nutzfeuer kein Unterschied, vorausgesetzt es werden jeweils Gegenstände unter gleichen Bedingungen erhitzt. Flammen, heiße Gase oder heiße Oberflächen können prinzipiell als Zündquellen wirksam werden, im Einwirkungsbereich befindliche brennbare Stoffe entzünden und damit letztlich einen Brand verursachen.

Unter naturwissenschaftlichen Gesichtspunkten muß man eher nach der Art der Wärmeeinwirkung bzw. genauer der Art der Wechselwirkungen zwischen Wärmequelle (und in diesem Sinne ist auch jedes Nutzfeuer als Wärmequelle aufzufassen) und brennbaren Materialien unterscheiden. In den Abschnitten 6.2.1 und 6.2.2 ist dargelegt, daß diese Wechselwirkungen von außerordentlich vielen

Parametern abhängig sind. So können Flammen mit genügend großer Flammenleistung (Nutz- oder Schadenfeuer) mit ihren hohen Temperaturen, vor allem bei Wärmestauwirkungen im beaufschlagten Material, vorwiegend durch Strahlung und Konvektion alle brennbaren Stoffe zünden. Bei anderen Wärmequellen (heiße Oberflächen, heiße Gasströme) hängt es in der bereits dargelegten Weise von der Temperaturdifferenz, dem Wärmestrom und der Wärmeableitung im belasteten Material ab, ob eine Zündung erfolgt oder nicht.

Unabhängig davon resultieren aus der Behandlung und Abgrenzung von Betriebsschäden eine Fülle von naturwissenschaftlichen und technischen Problemen, auf die im Rahmen dieser Arbeit nur andeutungsweise eingegangen werden kann. MARTIN definiert etwa den Begriff Wärme folgendermaßen: "Wärme beginnt, wo sie Zutritt und Berührung durch Menschen hindert, also bei etwa 50 °C, denn die AVB staffeln nicht nach Brennbarkeit der ausgesetzten Sachen" (MARTIN, 1986, S.602). Abgesehen davon, daß der Begriff "Wärme" physikalisch anders definiert wird, bezeichnet man Stoffe und Gegenstände, die bereits bei so niedriger Temperatur gezündet werden, als selbstentzündlich. 50 °C werden ohne Schwierigkeiten unter natürlichen Bedingungen erreicht, etwa im Sommer unter einem Dach; der Abstand zu Temperaturen, die von Menschen noch als erträglich empfunden werden, erscheint sehr gering. Für die technische Handhabung von an der Luft selbstentzündlichen Stoffen und Gegenständen ist es unwesentlich, ob eine Selbstentzündung bei Temperaturen von 30 oder 50 °C stattfinden kann.

Schon aus brandschutztechnischen Gründen ist zu beachten, daß viele Stoffe und Gegenstände unseres täglichen Gebrauchs eine relativ niedrige Zündtemperatur besitzen. Insbesondere cellulosehaltige Materialien, also u.a. Holzgegenstände, können bereits bei Temperaturen wenig über 100 °C langsam thermisch zersetzt werden. Bei länger andauernder Wärmebeanspruchung ist eine Zündung nicht auszuschließen (MAGNUS/WERTHENBACH, 1966;

SEEGER/WERTHENBACH, 1967; TOPF, 1971; ROBERTS, 1970; FRITZEN; 1984). Harzhaltiges Kiefernholz ist in dieser Hinsicht besonders empfindlich. Die Festlegung einer unteren Temperaturgrenze für eine Wärmebeanspruchung, die einen Brand verursachen kann, überschneidet sich wegen der nicht vermeidbaren Wechselwirkungen zwischen Wärmequellen unterschiedlicher Energieproduktion und Temperatur und brennbaren Stoffen, die je nach Konfiguration bei sehr verschiedenen Bedingungen gezündet werden (siehe oben), zwangsläufig mit dem Problemkreis der Brennbarkeit. Zu naturwissenschaftlichen Vorstellungen besteht also ein Widerspruch, wenn man bei der Klärung, ob ein Betriebsschaden anzunehmen ist, nicht berücksichtigt, inwieweit die Erwärmung einen Brand tatsächlich verursachen kann. Die rechtliche Beurteilung bleibt davon unberührt.

In einen verwandten Zusammenhang gehört auch die Brandentstehung in den Kohlenstaubablagerungen von Elektrofiltern. Neben der Frage einer betriebsmäßigen Wärmebeanspruchung ist hier für die versicherungspraktische Bewertung von Bedeutung, ob die Stärke der abgelagerten Schicht als normal (d.h. nach Art und Menge unvermeidlich) anzusehen ist (Betriebsschaden) oder ob es sich um Ablagerungen handelt, die man als störungsbedingt betrachten muß (d.h., die nicht hätten entstehen dürfen oder die vor Schadeneintritt hätten beseitigt werden müssen) (MARTIN, 1986). Abgesehen davon, daß im letztgenannten Fall zu prüfen ist, ob eine Reinigung fahrlässig versäumt wurde, handelt es sich hier um einen entschädigungspflichtigen Brandschaden.

Auch hier ist von Interesse (wahrscheinlich ist dies bereits geklärt), inwieweit die Erwärmung des Kohlenstaubes im Filter tatsächlich kausal für die Zündung und damit für den Brandschaden verantwortlich gemacht werden muß. Stäube von Fettkohlen und insbesondere Braunkohlenstäube gelten unter bestimmten Bedingungen als selbstentzündlich. Zusätzliche Erwärmung begünstigt zwar die Zündung, aber grundsätzlich kann eine Zündung im Bereich der Raumtemperatur nicht ausgeschlossen werden (BUSSENIUS, 1980).

Im Versicherungswesen wird die Auslegung der Betriebsschadenklausel kontrovers diskutiert. MARTIN (1986) erläutert, daß nur die von der Wärme unmittelbar beaufschlagten Gegenstände nicht versichert sind und daß daher die Grenze einer, vom Versicherungsausschluß erfaßten Feuer- oder Wärmewirkung quer durch eine Sache verlaufen kann. Die genauen Grenzen sind aber nur schwer und gelegentlich auch nur willkürlich zu ziehen (MEYER-KAHLEN, 1981; MARTIN, 1986). Nicht selten ist umstritten, inwieweit der Versicherungsausschluß auch Schäden an den Anlagen umfaßt, in denen die betriebsmäßige Wärme- oder Flammeneinwirkung stattgefunden hat (STÖCKLEIN, 1961; WALLISFURTH, 1964).

Aus technischen Gründen ist man geneigt, Stoffe und Gegenstände, die in einer Anlage umgewandelt oder bearbeitet werden und die Anlage selbst als eine Einheit zu betrachten. Dieser Betrachtungsweise schließt sich auch die Klausel 1102 (neuerdings 3102) an, nach der Brandschäden an Räucher-, Trocken- und sonstigen ähnlichen Erhitzungsanlagen und deren Inhalt auch dann zu ersetzen sind, wenn der Brand innerhalb der Anlagen ausbricht. Die Klausel macht damit den Ausschluß der Betriebsschäden teilweise wieder rückgängig.

Ob und inwieweit Begleit- und Folgeschäden von Betriebsschäden unter den Versicherungsschutz fallen, ist ebenfalls primär eine rechtliche Frage. Die Grenzziehung kann auch hier naturwissenschaftliche oder technische Hilfestellung erfordern.

Die unterschiedlichen Interpretationen der in den AFB gewählten Ausdrücke **betriebsmäßig**, **zu sonstigen Zwecken** und **ausgesetzt sein** und ihre einschließenden und ausgrenzenden Bedeutungen sind deutlich von den natürlichen Interessengegensätzen im Versicherungswesen geprägt. Dabei spielen Fragen eine sehr weitgehende Rolle, die nicht mehr mit naturwissenschaftlichen und technischen Methoden oder Anschauungen zu lösen sind, sondern die eine interdisziplinäre Betrachtungsweise erfordern. Die Auslegung der Betriebsschadenklausel stellt sich dem Verfas-

ser als ein sehr dichtes gedankliches Netzwerk dar, in dem juristische, naturwissenschaftlich-technische, nicht zuletzt wirtschaftliche und gelegentlich sogar linguistische Argumente eng miteinander verflochten sind. Prinzipiell lassen sich die naturwissenschaftlichen und technischen Sachverhalte der Einzelfälle wohl herausfiltern, aber eine solche Aufgabe würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten.

Insgesamt sind die Differenzen um die Auslegung des Betriebschadenbegriffs in den AFB wohl überwiegend unter dem Gesichtspunkt des Risikoausgleichs zwischen Versicherern und Versicherungsnehmern zu sehen. Inwieweit die geänderte Fassung dieser Begriffsbestimmung in den AFB 87 die Diskussionen vereinfacht, bleibt abzuwarten.

### **7.3 Verbrennungsähnliche Vorgänge, Verbrennungen unter abweichenden Bedingungen**

Es gibt eine Reihe von Prozessen, die ihrem äußeren Erscheinungsbild nach durchaus einer Verbrennung gleichen oder ihr sehr ähnlich sind. Dazu gehört beispielsweise der elektrische Lichtbogen, der so ähnlich aussieht wie eine Flamme oder die äußerlich der Glut eines Brandes vergleichbare glühende Schmelze. Daneben sind auch chemische Reaktionen in Flammen möglich, bei denen es sich eindeutig nicht um Verbrennungsreaktionen handelt. Thermische Bedingungen wie in einer Verbrennungszone, die den nach Bild 25 erläuterten Stabilitätskriterien entsprechen, sind auch unabhängig von den besprochenen chemischen Reaktionen möglich. Für die Aufrechterhaltung eines thermischen Gleichgewichts zwischen Wärmeerzeugung oder Wärmezufuhr einerseits und Wärmeableitung andererseits ist es im Grunde gleichgültig, wie die Wärme erzeugt oder zugeführt wird. Voraussetzung ist allerdings, daß sich in dem äußerlich verbrennungsähnlichen System eine Temperatur auf einem genügend hohen Niveau einstellt, so daß Licht emittiert wird.

Ein elektrischer Lichtbogen entsteht, wenn zwischen zwei sich

nicht berührenden Elektroden unter bestimmten Bedingungen, auf die hier nicht eingegangen wird, ein starker Strom aus Elektronen und Ionen fließt. Die beim Aufprall der Elektronen oder Ionen auf das Elektrodenmaterial (meist Kupfer bei elektrischen Drähten, Kohlenstoff beim Kohlelichtbogen) freiwerdende Energie erzeugt sehr hohe Temperaturen (in der Größenordnung von 4000 bis 20000 K). Derartige Lichtbögen sind auch bei Drahtbrüchen in elektrischen Anlagen und an defekten Kontakten möglich. Hierbei findet primär keine Verbrennung des Elektrodenmaterials statt. Allerdings können bei den hohen Temperaturen Oxidationsreaktionen mit dem ja zwangsläufig anwesenden Sauerstoff der Luft ausgelöst werden. Das gleiche gilt, wenn durch den Lichtbogen die Verbrennung von an und für sich schwer brennbarem elektrischen Isolationsmaterial induziert wird, der Lichtbogen also wie ein Stützfeuer wirkt.

Schäden, die durch die Wirkung des elektrischen Stromes an elektrischen Einrichtungen mit oder ohne Feuererscheinung entstehen, sind vom Versicherungsschutz ausgeschlossen und zwar sogar dann, wenn ein Lichtbogen ein Stützfeuer, etwa an elektrischem Isoliermaterial unterhält.

Anders verfährt man bei Schäden durch ausbrechende glühende Schmelzmassen. Hier hat man trotz Berücksichtigung der Tatsache, daß eine glühende Schmelze kein Feuer ist und daher auch definitionsgemäß kein Brand sein kann, die Möglichkeit geschaffen, durch Vereinbarung der Klausel 1103 (neuerdings 3107) den Feuerversicherungsschutz auf Schäden durch glühende Schmelzmassen zu erweitern.

Es ist aber strittig, ob die Klausel auf Zinkschmelzen angewendet werden kann, weil flüssiges Zink nicht glüht (!). Bei der tiefen Schmelztemperatur des Zinks von  $420^{\circ}\text{C}$  ist die Strahlung noch zu schwach, um als "Glut" empfunden zu werden. Der Siedepunkt von Zink ist mit ca.  $905^{\circ}\text{C}$  ebenfalls sehr niedrig.

An diesen Beispielen wird deutlich, daß man der optischen Strahlung des Brandes einerseits und (vergleichbarer) Glutmassen andererseits im Versicherungswesen entscheidende Bedeutung beimißt.

Schließlich gibt es eine Reihe thermodynamisch instabiler, chemischer Verbindungen, die beim Zerfall im Gasraum Wärme freisetzen, z.B. das Acetylen. Dieser Zerfall, der nach der Gleichung



erfolgt und bei höherem Druck explosiv verläuft, ist in strömendem Acetylen auch in Form stationärer oder sich ausbreitender Flammen möglich. Für die Versicherungspraxis haben Schäden, die aus solchen Zerfallsreaktionen entstehen können, allerdings wenig Bedeutung.

Neben diesen nach ihrem äußeren Erscheinungsbild als verbrennungsähnlich bezeichneten Vorgängen gibt es Verbrennungsprozesse, die unter besonderen Bedingungen ablaufen. Nicht nur die Verbrennung von kompaktem Stahl in Sauerstoff, die gelegentlich Schäden an Sauerstoffanlagen verursacht - einschlägige Schäden haben ja den Streit um die Eisenbrände ausgelöst -, sondern alle Verbrennungsvorgänge laufen in Sauerstoff oder in mit Sauerstoff angereicherten Atmosphären mit erheblich gesteigerter Intensität ab. Durch Anreicherung mit Sauerstoff wird die Zündenergie geringer und die Verbrennungstemperatur und -geschwindigkeit wesentlich größer (Bild 33).

Die Verbrennung von Eisen oder Stahl in reinem Sauerstoff oder stark mit Sauerstoff angereicherter Atmosphäre (auch hierbei ist an noch nicht oxidierten Eisenoberflächen eine Verbrennung unter erhöhtem Druck möglich) ist ein ebenfalls von den thermischen Gleichgewichtsbedingungen abhängiger Vorgang. Da Eisen als guter Wärmeleiter die bei der Oxidation produzierte Wärme gut aus der Reaktionszone entfernen kann, ist bei niedriger Sauerstoffkon-

zentration und bei Raumtemperatur nur eine langsame Oxidation des Eisens möglich. Bei hohen Temperaturen beschleunigt sich zwar die Reaktion - es entstehen die bekannten Anlauffarben - aber die Reaktionsgeschwindigkeit wird erst nach dem Schmelzen des Eisens groß genug, damit es in einer sehr rasanten Reaktion verbrennen kann. Der Reaktionsmechanismus ist inzwischen weitgehend geklärt.

Ähnliche Reaktionen laufen auch an anderen Metallen ab. Einige Metalle verbrennen bereits beim Sauerstoffpartialdruck der Atmosphäre, Alkalimetalle sind bei Raumtemperatur an der Luft schon selbstentzündlich.

Wie die Aufstellung in Abschnitt 6.2.1 zeigt, ist aber die Sauerstoffkonzentration nur einer von vielen Faktoren, die die Zündbarkeit und Brennbarkeit von Materialien beeinflussen. Insofern ist WÄLDER recht zu geben, der die Gesamtpalette möglicher Verbrennungsreaktionen, die zu einem Brandschaden führen können, in den Versicherungsschutz eingeschlossen sehen will.

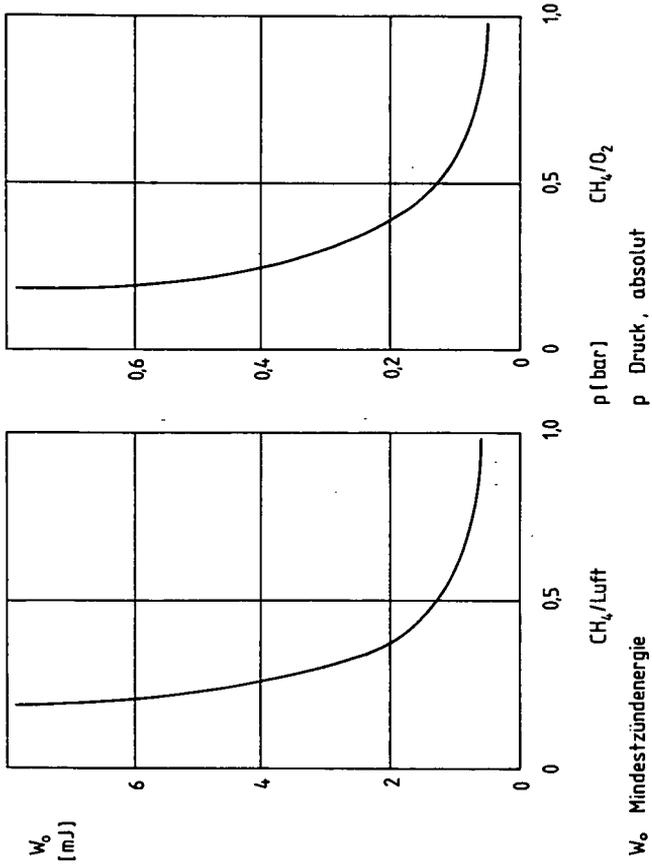


Bild 33: Mindestzündenergie von Methan/Luft- und Methan/Sauerstoff-Gemischen (nach LEWIS/VON ELBE)

## 8 Schlußbemerkungen

Die abschließenden Anmerkungen zum Brandbegriff im Versicherungswesen enthalten einige Schlußfolgerungen, die sich aus der Arbeit ergeben.

Unbestritten ist in allen Bereichen, die sich mit dem Brand als Schadenereignis zu befassen haben: **Der Brand ist ein Feuer.** Der Begriff "Verbrennung", der überwiegend in der Feuerungs- und Energietechnik üblich ist, würde im Versicherungswesen, aber auch im Brandschutzwesen weithin auf Unverständnis stoßen. Im Begriff **Feuer** kann man die gesamte Palette der Verbrennungsprozesse erfassen, also auch andere für eine Verbrennung dienende Oxidationsmittel als den Luft-Sauerstoff (Konzentration ca. 21 Vol.-%) und sogar verbrennungsähnliche Vorgänge einschließen (Flammen oder flammenähnliche Erscheinungen ohne Verbrennung). Demgegenüber ist der Begriff "Redoxreaktion", der auch in der Chemie praktisch nicht im Zusammenhang mit Verbrennungsvorgängen in Flammen oder mit Glut gebraucht wird, für die Auslegung des Feuerbegriffs im Versicherungswesen entbehrlich.

Im Übrigen wäre es wohl zweckmäßig, die Begriffsbestimmung für Feuer, sofern man sie im Versicherungswesen benötigt, nach dem aktuellen technischen Stand und entsprechend dem international einheitlichen Sprachgebrauch zu formulieren (siehe dazu DIN 50060; S.15 dieser Arbeit). An dieser Nahtstelle zwischen Naturwissenschaft, Technik und Versicherungswesen dürfen keine Unklarheiten und Widersprüche auftreten.

Der Begriff **Herd** als Bezeichnung für den Ort oder Raum, an oder in dem ein Feuer bestimmungsgemäß brennt, hat sich speziell im Versicherungswesen durchgesetzt. Es ist zu beachten, daß man im Widerspruch dazu auch vom Ort eines Brandes gelegentlich als "Brandherd" spricht. Das Verlassen des bestimmungsgemäßen Herdes (Raumes oder Bereiches) oder alternativ, die Entstehung außer-

halb eines bestimmungsgemäßen Herdes als Merkmale eines Brandes sind wohl unstrittig.

Dagegen sollte man das Merkmal **Ausbreitung aus eigener Kraft** ersetzen durch die Formulierung **unkontrollierte Ausbreitung**. Abgesehen davon, daß der Ausdruck "Kraft" wegen seiner festgelegten physikalischen Bedeutung zu Mißverständnissen Anlaß geben kann, ist bei näherer Untersuchung die selbständige Ausbreitung (aus eigener Kraft) nicht eine spezifische Eigenschaft eines Brandes, sondern Merkmal jeder autonomen Verbrennung (S. 87 ff.) Die Ausdrucksweise "unkontrollierte Ausbreitung" hat außerdem den Vorteil, daß sie mit den im Brandschutzwesen (Materialprüfung und Feuerwehrwesen) üblichen Formulierungen übereinstimmt.

## 9 Literaturverzeichnis

ALLGEMEINE FEUERVERSICHERUNGS-BEDINGUNGEN (AFB)  
vom 01.07.1930

ALLGEMEINE BEDINGUNGEN FÜR DIE FEUERVERSICHERUNG (AFB 87);  
Herausgegeben vom Verband der Sachversicherer;  
VdS 100 9/87 (02).

BALLUFF, C.: siehe SCHÖNBUCHER, A.

BERGHÖFER, R.:  
Grundlagen der Flammenfotografie, erarbeitet an ausgewählten  
Beispielen; Studienarbeit, BUGH Wuppertal, 1987.

BESSON, P.:  
Der Feuersturm; VFDB-Zeitschrift 9 (1960), H.1, S.5/12.

BRÖTZ, W.: siehe SCHÖNBUCHER, A.

BRÜGEL; W.:  
Physik und Technik der Ultrarotstrahlung; Curt R. Vincentz  
Verlag, Hannover, o.J.

BRUNSWIG, H.:  
Feuersturm über Hamburg - Die Luftangriffe auf Hamburg im 2.  
Weltkrieg und ihre Folgen; Motorbuch Verlag, Stuttgart,  
6. Auflage, 1983.

BUSSENIUS, S.:  
Brand- und Explosionsschutz in der Industrie; Staatsverlag der  
DDR; Berlin (Ost), 1982

BWK - BRENNSTOFF, WÄRME, KRAFT,  
Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure für  
Energiewirtschaft; VDI-Verlag, Düsseldorf, monatlich.

CASEY, C.J.: siehe HILADO, C.J.

CHEMIE - INGENIEUR - TECHNIK -

Verfahrenstechnik, Technische Chemie, Apparatewesen,  
Biotechnologie; Herausgeber: Dechema, GDCh, GVC, VDI;  
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim/Bergstr, monatlich.

COMBUSTION AND FLAME;

The Journal of the Combustion Institute; Elsevier Science  
Publishing Inc., Co., New York, monatlich.

CRC HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS:

Editor: R.C. Weast et al; CRC Press, Inc., 65th Edition, 1984.

CZERNY, M.:

Über die Rotgrenze der Augenempfindlichkeit; Zeitschrift für  
Naturforschung, 4a (1949), S.521/23.

DIN 4102, Teil 1:

Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Baustoffe,  
Begriffe, Anforderungen und Prüfungen (Mai 1981).

DIN 5499:

Brennwert und Heizwert - Begriffe (Januar 1972)

DIN 14 011, Teil 1:

Begriffe aus dem Feuerwehrewesen - Physikalische und chemische  
Vorgänge (Juli 1977).

DIN 50 060:

Prüfung des Brandverhaltens von Werkstoffen und Erzeugnissen -  
Begriffe (August 1985).

V DIN 18 230, Teil 1:

Brandschutz im Industriebau (November 1982).

DRYSDALE, D.:

Fire growth in compartments; FIRE 1980, pp. 90/92.

EICHENBERG, J.:

Experimentelle Untersuchungen über das Glimmverhalten von Cellulosestäben; Diplomarbeit, BUGH Wuppertal, 1984.

EICHENBERG, J.: siehe HÖLEMANN, H.

VON ELBE, G.: siehe LEWIS, B.

ESSER, R.:

Die Katastrophe als sicherheitswissenschaftliches Problem - Ein Modell zur Qualifizierung und Quantifizierung des Katastrophen-Risikos am Beispiel von Großwaldbränden im Hinblick auf ihre Verhütung; Dissertation, BUGH Wuppertal, 1985.

FALCKEMBERG, H.:

Die Gefahrendeckung der privaten Feuerversicherung in Deutschland, Österreich, der Schweiz und den Niederlanden; Verlag Versicherungswirtschaft e.V., Karlsruhe, 1973.

FRANK-KAMENETSKI, D.A.:

Diffusion and Heat Exchange in Chemical Kinetics; Princeton University Press, 1955.

FRANKE, H.:

Lexikon der Physik; Franck'sche Verlagshandlung, Stuttgart, 3. Auflage, 1969.

FREYTAG, H.H.:

Handbuch der Raumexplosionen; Verlag Chemie GmbH., Weinheim/Bergstr., 1965.

FRISTROM, R.M.; WESTENBERG, A.A.:

Flame Structure; McGraw-Hill Book Company, New York, 1965.

FRITZEN, B.:

Literaturstudien zum thermischen Abbau- und Entzündungsverhalten von Holz; Studienarbeit, BUGH Wuppertal, 1985.

GARDINER JR., W.C.; OLSON, D.B.:

Chemical Kinetics of High Temperature Combustion; Annual Review of Physical Chemistry 31 (1980), pp.377/99.

GARDINER JR., W.C.:

Das chemische Innenleben einer Flamme; Spektrum der Wissenschaft, H.4, 1982, S.90/101.

GARRIS; C.A.: siehe MOUSSA, N.A.

GAYDON, A.G.; WOLFHARD, H.G.:

Flames; Chapman & Hall Ltd., London, 1953.

VON GIERKE, J.:

Der Begriff des Brandes in der Feuerversicherung; Zeitschrift für das gesamte Handelsrecht und Konkursrecht 71 (1912), S.327/59.

GÖCK, D.: siehe SCHÖNBUCHER, A.

GOLDENBERG, S.A.; PELEVIN, V.S.:

7th Symposium (International) on Combustion; Butterworth, London 1959.

GRIFFIN, D.R.; HUBBARD, R.; WALD, G.:

The Sensitivity of the Human Eye to Infra-Red Radiation; Journal of the Optical Society of America 37 (1947) No.7, pp. 546/554.

GÜNTHER, R.:

Verbrennung und Feuerungen; Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New-York, 1974.

HELMER, G.:

Der Brandbegriff und die unechten Schäden in der deutschen Feuer-  
versicherung; Verlag: Verband öffentlicher Feuerversicherungs-  
anstalten in Deutschland, Berlin-Dahlem, 1930.

HEMMINGER, W; HÖHNE, G.:

Calorimetry - Fundamentals and Practice; Verlag Chemie, Weinheim -  
Deerfield Beach (Florida) - Basel, 1984.

HERDT; A.:

Die mehrfache Kausalität im Versicherungsrecht und ihre Beur-  
teilung bei Vorliegen von Klarstellungen und Ausschlußklauseln;  
Veröffentlichungen des Seminars für Versicherungswissenschaft  
der Universität Hamburg und des Versicherungswissenschaftlichen  
Vereins in Hamburg e.V., Heft 54; Verlag Versicherungswirt-  
schaft, Karlsruhe, 1978.

HILADO, C.J.; CASEY, C.J.:

Pyrolysis of Polymeric Materials: Chemical Structure, Tempera-  
ture, Heating rate, and Air Flow on Char Yield and Toxicity;  
Journal of Fire and Flammability 10 (1979), pp.140/167.

HÖHNE, G.: siehe HEMMINGER, W.

HÖLEMANN, H.:

Schwel- und Glimmversuche an Baustoffen;  
wksb - Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz,  
Brandschutz, Neue Folge H.18 (1984), S.1/9.

HÖLEMANN, H.; WOPPENBERG, R.:

Untersuchungen zur Entstehung von Bränden durch Schweißen Schnei-  
den und verwandte Verfahren - Auswertung von Schadensfällen;  
Schweißen und Schneiden 38 (1986) , H.4, S.180/85.

HÖLEMANN, H.; WOPPENBERG, R.; SCHMEJA, B.; EICHENBERG, J.:

Untersuchungen zur Zündung von Bränden, insbesondere Schwel- und

Glimmbränden durch glühende Partikel; Forschungsbericht, BUGH Wuppertal, 1987.

HUBBARD, R.: siehe GRIFFIN, D.R.

JACH, W.:

Wie sind "Eisenbrände" naturwissenschaftlich und "versicherungstechnisch" in den Haftungsbereich der Allgemeinen Feuerversicherungsbedingungen einzuordnen; Stellungnahme vom 15.08.1966.

JACH, W.:

Neuester Stand des Ablaufs biologischer Selbsterhitzungen; 4. Internationales Brandschutzseminar (IBS), Zürich, 1973; Bd.1, S.41/58.

JOHN, R.:

Untersuchung der Selbstentzündung selbstentzündlicher Stoffe, insbesondere von Holz; AGF-Forschungsbericht Nr.13, Karlsruhe, 1969.

JOST, W.; WAGNER, H.G.:

Der Verbrennungsvorgang in der Gasphase; in FREYTAG, H.H., a.a.O.

KAUFHOLD, F.:

Verbrennen und Löschen -Die physikalisch-chemischen Grundlagen des Verbrennungs- und Löschvorgangs, die Löschverfahren und Löschmittel, 11. Auflage; Die Roten Hefte, H.1; W. Kohlhammer-Verlag, Stuttgart - Berlin - Köln - Mainz, 1975.

KOHLHAAS, W.:

Untersuchungen zur Ausbreitung von Glimmbränden in einer geschlossenen Apparatur; Diplomarbeit, BUGH Wuppertal, 1982.

KORDINA, K.; KRAMPF, L.:

Erhebungen über den Brandverlauf und Schäden bei Großbränden;

2. Statusseminar des BMFT: Sicherheit, Brand- und Katastrophenbekämpfung, Notfallrettung; S. 271/77, Deutscher Gemeindeverlag, Köln, 1982.

KORDINA, K.; SCHNEIDER, U.:

Grundlagen des baulichen Brandschutzes im Industriebau; aus "Beiträge zur Bautechnik", S.45/60, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, 1980.

KRAMPF, L.:

Brandverlauf und Schäden bei Großbränden; VFDB-Zeitschrift 33 (1984), S.3/9.

KREIS, U.:

Die Zigarette als Zündquelle; Studienarbeit, BUGH Wuppertal, 1986

KWIATKOWSKI, VON, K.:

Über den Einfluß höherer Temperaturen auf die Gültigkeit der Regel von Le Chatelier zur Berechnung der Grenzen der Flammenausbreitung von Brenngas-Luft-Gemischen; Dissertation RWTH Aachen, 1966.

LANDGERICHT BERLIN I:

Urteil vom 29.09.1910.

LANDGERICHT HAMBURG:

Urteil vom 03.02.1911; Veröffentlichungen des Aufsichtsamtes 1911, S.73.

LANDOLT-BÖRNSTEIN:

Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, 4. Band: Technik; 4. Teil: Wärmetechnik, Bandteil b: Thermodynamische Eigenschaften von Gemischen, Verbrennung, Wärmeübertragung; Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 1972.

LAU, E.; LEO, W.:

Über die Augenempfindlichkeit an der ultraroten Grenze; Annalen der Physik, 6. Folge, Bd.2 (1948), S. 242/55.

LEWIS, B.; VON ELBE, G.:

Combustion, Flames, and Explosions of Gases; Academic Press, New York - San Francisco - London, 2nd Edition, 1961.

LEXIKON DER PHYSIK: siehe FRANKE, H.

LÖHMER, S.:

persönliche Mitteilung.

MAGNUS, G.; WERTHENBACH, H.G.:

Kritische Untersuchung der Verfahren zur Untersuchung der Selbstentzündungsneigung, einschließlich der Untersuchung über die trockene Destillation von Holz; AGF-Bericht Nr. 8, Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Karlsruhe, 1986.

MARTIN, A.:

Sachversicherungsrecht - Kommentar zu den Allgemeinen Versicherungsbedingungen für Hausrat, Wohngebäude, Feuer, Einbruchdiebstahl und Raub, Leitungswasser, Sturm einschließlich Sonderbedingungen und Klauseln;

2. Auflage, C.H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München, 1986.

MARTIN: siehe PRÜLSS/MARTIN.

MEYER-KAHLEN, W.:

Inwieweit enthält die allgemeine Betriebsschädenklausel in der Feuerversicherung (auch) einen echten Risikoausschluß?

Versicherungspraxis 1981, H.4, S.132/138.

MEYER-KAHLEN, W.:

Zur Auslegung von § 1 Abs.2 Satz 2 Alternative 2 AFB;

Versicherungspraxis 1981, H.5, 167/172.

MEYER-KAHLEN, W.:

Kausalitätsprobleme der AFB-Betriebsschädenklausel;  
Versicherungspraxis 1981, H.6, S.181/185.

MEYER-KAHLEN, W.: siehe VELLGUTH, H.K.

MOUSSA, N.A.; TOONG, T.Y.; GARRIS, C.A.:

Mechanism of Smoldering of Cellulosic Materials; 16th Symposium  
(International) on Combustion 1977, pp.1447/57.

MUTSCHLER, E: siehe THEWS, G.

OBERLANDESGERICHT HAMBURG:

Urteil zu AFB §1; ABGB §5 vom 2.10.1986 (6 U 44/86);  
Versicherungsrecht 1987, H.19, S.479/480.

OHLEMILLER, T.J.: siehe ROGERS, F.E.

OLSON, D.B.: siehe GARDINER JR., W.C.

PELEVIN, V.S.: siehe GOLDENBERG, S.A.

POHL, K.D.:

Handbuch der naturwissenschaftlichen Kriminalistik;  
Kriminalistik-Verlag, Heidelberg, 1981.

PORST, P.: siehe SCHREIBER, H.M.

PRAGER, F.H.:

Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bewertung der  
Rauchgastoxizität; Dissertation, RWTH Aachen, 1985.

PRÖLSS/MARTIN:

Versicherungsvertragsgesetz; Kommentar zum VVG mit Erläuterungen  
zu den wichtigeren Versicherungsbedingungen - unter Berücksichtigung  
österreichischer Rechtsprechung - von Dr. U. Knappmann,

Dr. A. Martin, Dr. J. Prölss und W. Voit.;  
Beck'sche Kurz-Kommentare, Band 14, 24. Auflage, C.H. Beck'sche  
Verlagsbuchhandlung, München, 1988.

RAISER, R.:

Kommentar zu den Allgemeinen Feuerversicherungsbedingungen;  
2. Auflage, Berlin, 1937.

RAUSSERT, A.:

Über die Zündung von Glimmbränden an Zellstoffproben;  
Diplomarbeit, BUGH Wuppertal, 1984.

REICHSGERICHT LEIPZIG:

Urteil des V. Strafsenats vom 11.10.1907 - 476/07; aus:  
Juristische Wochenschrift 37 (1908), Nr.44, S.168.

ROBERTS, A.F.:

A Review of Kinetics Data for the Pyrolysis of Wood and Related  
Substances; Combustion and Flame 14 (1970), pp.261/270.

ROGERS, F.E.; OHLEMILLER, T.J.:

A survey of several factors influencing smouldering combustion  
in flexible and rigid polymer foams; Journal of Fire and  
Flammability 9 (1978), p.489.

RONKEN, L.:

Untersuchung der Gefahren beim Umgang mit Einweg-Gasfeuerzeugen;  
Studienarbeit, BUGH Wuppertal, 1982

SBLOWSKI, W.:

Der Brandbegriff - ein halbes Jahrhundert. Zeitgemäßer Begriff  
im Wandel der Zeit? Zeitschrift für Versicherungswesen 1981,  
H.19, S.493/497.

SCHEICHL, L.:

Brandlehre und chemischer Brandschutz; Dr. Alfred Hüthig Verlag,  
Heidelberg, 2. Auflage, 1958.

SCHIESS, N.: siehe SCHÖNBUCHER, A.

SCHMEJA, B.: siehe HÖLEMANN, H.

SCHNEIDER, U.: siehe KORDINA, K. (1980).

SCHOLTE, T.G.; VAAGS, P.B.:  
Combustion and Flame 3 (1959), p.501.

SCHÖNBUCHER, A.; BRÖTZ, W.; BALLUFF, C.; GÖCK, D.; SCHIESS, N.:  
Erforschung von Schadenfeuern flüssiger Kohlenwasserstoffe als  
Beitrag zur Sicherheit von Chemieanlagen; Chemie-Ingenieur-  
Technik 57 (1985), S.823/34.

SCHREIBER, H.M.; PORST, P.:  
Löschmittel - Chemisch-physikalische Vorgänge beim Verbrennen  
und beim Löschen; Staatsverlag der DDR, Berlin, 1972.

VON SCHWARTZ, E.:  
Handbuch der Feuer- und Explosionsgefahr;  
Feuerschutzverlag Ph.L. Jung, München, 6. Auflage, 1964.

SEEGER, P.G.; WERTHENBACH, H.G.:  
Über die Selbstentzündungsneigung von Holz; VFDB-Zeitschrift  
16 (1967), S.131/139.

STEINMETZ, J.:  
Möglichkeiten der kriminalistischen Beurteilung von Kupferlei-  
tern im Rahmen der Brandursachenermittlung anhand makro- und  
mikrostruktureller Analysen; Studienarbeit, BUGH Wuppertal,  
1983.

STÖCKLEIN, K.-H.:  
Auslegung der Betriebsschädenklausel 1.02 in Verbindung mit  
§ 1(2) AFB; Versicherungswirtschaft 1961, S.64/68.

STÖR, H.:

Bagatellschäden in der Feuerversicherung; Neumanns Zeitschrift für das Versicherungswesen 1909, S.339/40.

SYMPOSIA (INTERNATIONAL) ON COMBUSTION:

Veranstalter: Combustion Institute, Chicago, jährlich.

THEWS, G.; MUTSCHLER, E.; VAUPEL, P.:

Anatomie - Physiologie - Pathophysiologie des Menschen - Ein Lehrbuch für Pharmazeuten und Biologen; 2. Auflage, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH., Stuttgart, 1982.

TOONG, T.Y.: siehe MOUSSA, N.A.

TOPF, P.:

Die thermische Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 180 °C; Holz als Roh- und Werkstoff 29 (1971), H.7, S. 269/275; H.8, S.295/300.

TROITZSCH, J.:

Brandverhalten von Kunststoffen - Grundlagen, Vorschriften, Prüfverfahren; Carl Hanser Verlag, München, 1982.

ULLMANN'S ENCYKLOPÄDIE DER TECHNISCHEN CHEMIE;

Band 2/1: Anwendung physikalischer und physikalisch-chemischer Methoden im Laboratorium; Herausgeberin: H. Buchholz-Meisenheimer; Verlag Urban und Schwarzenberg, München, 1961.

VAAGS, P.B.: siehe SCHOLTE, T.G.

VAUPEL, P.: siehe THEWS, P.

VELLGUTH, K.H.: siehe MEYER-KAHLEN, W.

VOSSEN, O.:

Technische Probleme in der Feuerversicherung; ZVersWiss 1968, S. 505/520.

WAGNER, H.G. (1965): siehe JOST, W.:

WAGNER, H.G.:

Zur Chemie der Rußbildung; Vortrag im Chemischen Kolloquium der Universität Dortmund, 13.01.86.

WALD, G.: siehe GRIFFIN, R.

WÄLDER, J.:

Das fragwürdige Merkmal Feuer im Brandbegriff der Feuerversicherung; ZVersWiss 1971, S. 657/686.

WALLISFURTH, R.M.

Versicherungsschutz gegen Schäden durch glühend-flüssige Schmelzmassen; Versicherungswirtschaft 1963, S.135/138.

WALLISFURTH, R.M.:

Kann man Betriebsschäden versichern? Versicherungswirtschaft 1964, 993/96.

WERTHENBACH, H.G.; siehe MAGNUS, G.

WERTHENBACH, H.G.: siehe SEEGER, P.G.

WESTENBERG, A.A.: siehe FRISTROM, R.M.

WOLFHARD, H.G.: siehe GAYDON, A.G.

WORPENBERG, R.: siehe HÖLEMANN, H.

WUSSOW, W.:

Feuerversicherung - Kommentar zu den AFB und den §§ 1127 -1130 BGB, 97 - 107c VVG; 2. Auflage, Robbers u.Co. Verlag, Dornheim, 1975.

In dieser Schriftenreihe sind bisher erschienen

Prof. Dr. Norbert Horn

Die Allgemeinen Feuerversicherungsbedingungen (AFB)  
und das AGB-Gesetz\*

Heft 1

Der Versicherungsbedarf der deutschen Wirtschaft  
nach dem Jahr 2000

Dokumentation über ein Symposium der Fördergesellschaft

Heft 2

Dr. Ralf Johannsen

Haftpflichtversicherungsschutz gegen Umweltschäden  
durch Verunreinigung des Erdbodens und der Gewässer

Heft 3

o. Univ.-Prof. Dr. Attila Fenyves

Die rechtliche Behandlung von Serienschäden  
in der Haftpflichtversicherung

Heft 4

Dr. Friedrich Hosse · Wolfgang Poppelbaum

Systemvergleich der privaten  
und der öffentlichen Gebäudefeuerversicherung

Heft 5

\* Auflage vergriffen

# HAMBURGER GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DES VERSICHERUNGSWESENS MBH, HAMBURG

---

---

Die im Jahre 1982 gegründete Gesellschaft hat zum Ziel, das Versicherungswesen durch Vergabe von Untersuchungen und Gutachten sowie durch Unterstützung von wissenschaftlichen Forschungsaufträgen zu fördern.

Bei ihrer Arbeit wird die Gesellschaft durch einen Beirat aus Versicherungswirtschaft, Dienstleistung, Industrie und Wissenschaft unterstützt, der die Vergabe der nicht interessen- gebundenen Aufträge lenkt und überwacht.

Die Ergebnisse der Untersuchungen und Forschungsaufträge stehen allen interessierten Kreisen zur Verfügung. Veröffentlicht werden sie unter anderem im Rahmen einer eigen- ständigen Publikationsreihe.

Das Stammkapital der mit 1 Mio DM ausgestatteten Gesellschaft liegt bei der Jauch & Hübener Gruppe.  
Die Gesellschaft strebt keinen Gewinn an.

## Beirat

Dr. Axel Biagosch, Colonia Versicherungen  
Prof. Dr. Dieter Farny, Universität Köln  
Dr. Hermann Krämer, Preussen Elektra AG  
Ewald Lahno, Jauch & Hübener  
Walter Meyer-Kahlen, Thyssen AG  
Helmut Müller, BAV  
Prof. Dr. Manfred Werber, Universität Hamburg

Geschäftsführer  
Dr. Jürgen Hübener, Rechtsanwalt