

Nachweisverfahren für den Brandschutz in Kernkraftwerken

T 1818

T 1818

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Prof. Dr.-Ing. habil. U. Schneider
Fachgebietsleiter für Baustoffkunde
Amtliche Baustoff- und Betonprüfstelle F



**Gesamthochschule
Kassel · Universität**

Fachbereich 14
Bauingenieurwesen

A B S C H L U S S B E R I C H T

N A C H W E I S V E R F A H R E N

F Ü R D E N B R A N D S C H U T Z

I N K E R N K R A F T W E R K E N

U. SCHNEIDER

D. HOSSER

U. MAX

OKTOBER 1986

Das Vorhaben wird im Auftrag des Instituts für Bautechnik,
Berlin, bearbeitet.

Az.: IV 1 - 5 - 424/85

INHALT

	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Herleitung eines vereinfachten brandschutz- technischen Nachweisverfahrens	2
2.1 Nachweiskonzept	2
2.1.1 Grundsätzliche Anforderungen	2
2.1.2 Angaben für das Brandschutzkonzept ...	5
2.1.3 Beurteilung der Brandwirkungen	6
2.1.4 Auslegung der bautechnischen Brand- schutzmaßnahmen	7
A.2.1 Vereinfachte Nachweisverfahren	9
A.2.1.1 Beurteilung der Brandwirkungen	9
A.2.1.2 Rechnerische Auslegung der bau- technischen Brandschutzmaß- nahmen	10
2.2 Statistische Datenbasis	13
2.2.1 Überblick	13
2.2.2 Brandentstehungshäufigkeit	13
2.2.3 Ausfallwahrscheinlichkeit der aktiven Brandschutzmaßnahmen	14
2.2.4 Häufigkeit von vollentwickelten Brän- den	15
2.3 Wärmebilanzrechnungen zur Erstellung von Bemessungshilfen	15
2.3.1 Überblick	15
2.3.2 Grundlagen der Wärmebilanzrechnung ...	17
2.3.3 Abbrandmodelle	20
2.3.4 Umfang der Parameterstudie	25
2.3.5 Ölbrände	27
2.3.6 Kabelbrände	27
2.3.7 Auswertung	28

2.4	Überlegungen zum Sicherheitskonzept ..	42
2.4.1	Überblick	42
2.4.2	Parameterunsicherheiten bei den Brand- wirkungen	45
2.4.3	Parameterunsicherheiten bei den Feuer- widerstandsdauern	50
2.4.4	Herleitung von Sicherheitsbeiwerten für die Bemessung	52
3.	Praktischer Bemessungsvorschlag	58
3.1	Grundkonzept und Voraussetzungen	58
3.2	Bemessungshilfen	59
3.3	Anwendungsbeispiele	65
4.	Beurteilung der Brandrauchbildung	70
4.1	Allgemeines	70
4.2	Messung der optischen Brandrauchdichte	71
4.3	Sichtbehinderung durch Brandrauch	72
4.4	Zulässige Rauchdichten in Rettungs- wegen	77
4.5	Erforderliche Verdünnung des Brand- rauches aus optischen Gründen	79
4.6	Erforderliche Verdünnung des Brand- rauches aus toxischen Gründen	82
4.7	Berechnung der Brandrauchbildung	85
5.	Ermittlung des Druckaufbaus in geschlossenen Systemen	90
5.1	Grundlagen	90
5.2	Berechnung des Druckaufbaus bei gleich- zeitiger Luftabfuhr	92
5.3	Berechnung des Druckaufbaus bei Unter- druckhaltung	98
5.4	Vereinfachte Druckberechnung	102
6.	Zusammenfassung und Empfehlungen	104
7.	Literaturverzeichnis	106

VORBEMERKUNG

Das Forschungsvorhaben "Nachweisverfahren für den Brandschutz in Kernkraftwerken" hat zum Ziel, Grundlagen für ein vereinfachtes brandschutztechnisches Nachweisverfahren in KKW mit DWR-Anlagen zu erarbeiten. Auf der Basis des derzeitigen Standes von Wissenschaft und Technik sollte versucht werden, ein Konzept zu erarbeiten, welches als Beratungsunterlage in das Regelgremium des KTA 2101.2 "Brandschutz in Kernkraftwerken, Teil 2: Brandschutz in baulichen Anlagen" einfließen kann.

Die theoretische Erarbeitung und numerische Untermauerung eines solchen Konzeptes ist primäre Aufgabe dieses Vorhabens. In Bezug auf die erreichbaren Genauigkeiten und praxisorientierten Anwendungen mußten dabei auch Kompromisse und Näherungen gefunden werden, die zu reproduzierbaren und auf der sicheren Seite liegenden Werten führen. Ob dies in allen Fällen gelungen ist, kann nur durch die Fachöffentlichkeit beurteilt werden.

Eine Übertragung der vorgelegten Ergebnisse auf andere Bereiche des Brandschutzes ist nicht vorgesehen. Ob die hier verwandten spezifischen Brandgrößen bzw. Eingabedaten und Randbedingungen dafür geeignet sind, müßte in jedem Einzelfall überprüft werden. Die angewandte Methodik ist jedoch grundsätzlich für die Anwendung in anderen Bereichen des baulichen Brandschutzes geeignet.

1. EINLEITUNG

Das Forschungsvorhaben "Nachweisverfahren für den Brandschutz in Kernkraftwerken" baut auf dem im März 1984 abgeschlossenen Vorläufervorhaben "Regelung des Brandschutzes in Kernkraftwerken auf der Grundlage bauaufsichtlicher Vorschriften" auf. Im Teil B3 des Abschlußberichtes /1/ wurde unter der Überschrift "Nachweise und Auslegung" ein vereinfachtes brandschutztechnisches Nachweisverfahren vom Ansatz her skizziert. Das Nachweiskonzept wurde von den Mitarbeitern dieses Vorhabens in die Beratungen zur KTA-Regel 2101.2 "Brandschutz in Kernkraftwerken, Teil 2: Brandschutz an baulichen Anlagen" /2/ eingebracht (vgl. Abschnitt 2).

Die theoretische Absicherung und numerische Untermauerung des Nachweiskonzeptes ist Gegenstand dieses Vorhabens. Insbesondere gilt es, ein hinreichend begründetes, einfach durchzuführendes und zu prüfendes Nachweisverfahren mit entsprechenden Bemessungshilfen bereitzustellen. Der erfolgreiche Abschluß wird letztendes mit darüber entscheiden, ob und in welchem Umfang künftig eine an den tatsächlichen Brandrisiken orientierte brandschutztechnische Bemessung bei Kernkraftwerken zum Stand der Technik gehören wird.

Das Bemessungsverfahren soll anhand von Wärmebilanzrechnungen hergeleitet und abgesichert werden. Auf der Grundlage einer umfangreichen Parameterstudie werden die in KKW's mit geringer Wahrscheinlichkeit zu erwartenden Brandverläufe theoretisch abgeschätzt und durch entsprechende Bauteilanalysen in ein vereinfachtes Nachweiskonzept transformiert. Dabei wird grundsätzlich von konservativen Annahmen ausgegangen. Der Abschlußbericht enthält erste Ergebnisse dieser Berechnungen und darüber hinaus einige vorläufige Angaben über die zu ermittelnden Bemessungshilfen.

2. HERLEITUNG EINES VEREINFACHTEN BRANDSCHUTZTECHNISCHEN NACHWEISVERFAHRENS

2.1 Nachweiskonzept

Bei den Beratungen zu KTA 2101.2 wurden die in dem Vorläufer-
vorhaben /1/ erstmalig vorgetragenen und zwischenzeitlich ver-
besserten konzeptionellen Vorstellungen durch die Herren Hossler
und Schneider vertreten. Alle Textvorschläge zu Abschnitt 3
"Brandschutzkonzept der baulichen Anlagen" und zu dem zugehöri-
gen Anhang 1 "Vereinfachte Nachweisverfahren" wurden im Rahmen
dieses Vorhabens erstellt und von einem kleinen Arbeitskreis
lediglich redaktionell überarbeitet, so daß sich ein entspre-
chender Regeltextvorschlag ergab. Die jetzt einvernehmlich im
Arbeitsausschuß verabschiedete Fassung vom Oktober 1985 wird nachfolgend
zitiert:

Zitatanfang:

2.1.1 Grundsätzliche Anforderungen

- (1) Die Vorschriften der Bauordnung gelten auch für bau-
liche Anlagen von Kernkraftwerken, soweit an diese
zum Schutz von Personen und Sachen keine besonderen
Anforderungen (höhere Anforderungen) zu stellen sind
oder Erleichterungen gestattet werden können.

- (2) Höhere Anforderungen sind zu stellen, wenn sie
 - a) aufgrund eines erhöhten Brandrisikos, z.B. größere
Brandlasten, erhöhte Zündgefahr, ungünstige Lüf-
tungsbedingungen oder erschwerte Zugänglichkeit
oder

- b) zum Schutz von Einrichtungen des Sicherheitssystems

erforderlich sind.

- (3) Erleichterungen von einer Vorschrift der Bauordnung können im Einzelfall gestattet werden, wenn

- a) es der Einhaltung der Vorschrift offensichtlich nicht bedarf, z.B. bei geringem Brandrisiko, oder
- b) es aus betrieblichen Gründen erforderlich ist und die Schutzziele durch gleichwertige Maßnahmen erreicht werden.

- (4) Die in dieser Regel festgelegten Brandschutzmaßnahmen berücksichtigen die Besonderheiten ortsfester Kernkraftwerke. Sie füllen die Vorschriften der Landesbauordnungen über bauliche Anlagen besonderer Art oder Nutzung aus. Einer Befreiung von entgegenstehenden Vorschriften (z.B. über Brandwände, Rettungswege) bedarf es daher nicht mehr.

- (5) Reichen bautechnische Brandschutzmaßnahmen zum Personen- und Sachschutz nur dann aus, wenn ein vollentwickelter Brand durch eine rasche Branderkennung und -bekämpfung verhindert wird, so ist bei der Beurteilung der Maßnahmen der zeitliche Ablauf und die Wirksamkeit der Branderkennung und -bekämpfung zu bewerten.

Hinweis: Im allgemeinen ist eine qualitative Bewertung ausreichend.

- (6) Sind an bautechnische Brandschutzmaßnahmen aus sicherheitstechnischen Gründen zusätzliche Anforderungen, z.B. Strahlenschutzanforderungen, zu stellen, so ist ihre Brandschutzfunktion unter Zugrundelegung besonderer Kriterien, z.B. ausreichende Abschirmung, zu beurteilen.
- (7) Müssen bauliche Brandschutzmaßnahmen ihre Brandschutzfunktionen auch während oder nach einem angenommenen Ereignis gemäß KTA 2101.1 Abschnitt 3.2 erfüllen, so sind diese Brandschutzmaßnahmen unter Zugrundelegung zusätzlicher Einwirkungen, z.B. Erdbeben gemäß KTA 2101.1 Abschnitt 3.2.3 (2a), zu beurteilen.
- (8) Die Erfüllung der Brandschutzfunktionen baulicher Brandschutzmaßnahmen im Brandfall ist sowohl hinsichtlich der Baustoffe und Bauteile als auch der technischen Anlagen und Einrichtungen durch Brauchbarkeitsnachweise, Bauüberwachungen, sowie durch erstmalige und wiederkehrende Prüfungen nach KTA 2101.1 Abschnitt 7 sicherzustellen.

Im Einzelfall kann der Brauchbarkeitsnachweis für eine Brandschutzmaßnahme entfallen, z.B.

- wenn ausreichende Erfahrungen über ihre Wirksamkeit unter Berücksichtigung der übrigen Brandschutzmaßnahmen vorhanden sind, oder
- bei einer gleichmäßig verteilten Brandlast bis zu $\dots \text{kWh/m}^2$ *) und einer Raumhöhe über $\dots \text{m}$ *).

Dies gilt nicht für Brandwände.

*) Beratung über die anzusetzenden Werte zunächst im AK

2.1.2 Angaben für das Brandschutzkonzept

- (1) Bei der Erarbeitung des Brandschutzkonzeptes sind alle Bedingungen zu erfassen, die für die Entstehung, Ausbreitung und für die Wirkungen von Bränden in den Anlagenbereichen von Bedeutung sind.

- (2) Für Räume oder Raumgruppen sind die Brandlasten anzugeben. Sofern die Brandlasten über ...kWh/m² *) betragen, sind zusätzlich folgende Angaben zu machen über:
 - Zündquellen
 - sicherheitstechnische Bewertung der von einem Brand betroffenen Anlagenteile
 - bautechnische Brandschutzmaßnahmen mit Brauchbarkeitsnachweisen (für Baustoffe und Bauteile)
 - Brandmeldeanlagen mit Auslegung
 - Feuerlöscheinrichtungen mit Auslegung
 - Lüftungstechnische Anlagen mit Schemata, Steuerungskonzept, Lüftungsraten
 - Rauch- und Wärmeabzugseinrichtungen mit Auslegung.

- (3) In Anlagenbereichen, in denen gemäß KTA 2101.1 Abschnitt 3.2 Brand in Kombination mit einem angenommenen Ereignis zu betrachten ist, sind die aus dem angenommenen Ereignis resultierenden zusätzlichen Anforderungen (z.B. zuverlässige Redundanztrennung) oder zusätzliche Einwirkungen (z.B. erhöhter Druck, Strahlkräfte) zu benennen.

*) Beratung über die anzusetzenden Werte zunächst im AK

- (4) Es sind diejenigen baulichen Brandschutzmaßnahmen zu benennen, deren Brandschutzfunktion auch nach dem kleineren Erdbeben gemäß KTA 2101.1 Abschnitt 3.2.3 (2b) sichergestellt sein muß.

2.1.3 Beurteilung der Brandwirkungen

- (1) Als Brandwirkungen kommen in Betracht:
 - Temperaturentwicklung im Brandraum
 - Temperaturentwicklung außerhalb des Brandraumes
 - Rauchentwicklung und Rauchausbreitung
 - Druckaufbau im Brandraum.

- (2) Bei der Beurteilung der Brandwirkungen sind folgende Randbedingungen zu beachten:
 - Brandlasten und Zündquellen
 - Raumgeometrie und Lüftungsverhältnisse
 - Möglichkeiten der Brandmeldung und Brandbekämpfung.

- (3) Soweit keine ausreichenden Erfahrungen vorliegen, sind für die Beurteilung der Brandwirkungen Nachweise zu erbringen. Diese Nachweise dürfen durch Versuche oder mit Berechnungsverfahren erbracht werden.

- (4) Vereinfachte Verfahren zur rechnerischen Ermittlung der Brandwirkungen werden im Anhang beschrieben.

2.1.4 Auslegung der bautechnischen Brandschutzmaßnahmen (noch nicht abschließend beraten!)

(1) Sofern keine Erfahrungen vorliegen, ist experimentell oder rechnerisch nachzuweisen, daß die bautechnischen Brandschutzmaßnahmen den nach Abschnitt 3.3 ermittelten Brandwirkungen ohne Verlust ihrer Brandschutzfunktion (z.B. Standsicherheit, Raumabschluß) standhalten.

(2) Bei rechnerischen Nachweisen dürfen vereinfachte Verfahren angewendet werden, wie sie im Anhang beschrieben werden.

(3) Anstelle eines experimentellen oder rechnerischen Nachweises darf alternativ die ausreichende Sicherheit der bautechnischen Brandschutzmaßnahmen auch durch Analogiebetrachtung oder durch Plausibilitätsbetrachtung nachgewiesen werden.

Hinweis: Bei Analogiebetrachtungen ist von Referenzergebnissen experimenteller oder rechnerischer Nachweise auszugehen, die für vergleichbare (z.B. in Bauart, Baustoff, Abmessungen) bautechnische Brandschutzmaßnahmen unter vergleichbaren Belastungen (z.B. Temperatureinwirkung, Gebrauchslast, ggf. zusätzliche Belastung infolge Störfälle) erbracht wurden. Plausibilitätsbetrachtungen dürfen auf der Basis der Auslegung der bautechnischen Brandschutzmaßnahmen für andere Lastfälle durchgeführt werden mit dem Ziel, zu ermitteln, ob aufgrund der Konstruktion eine ausreichende Sicherheit als gewährleistet angesehen werden kann.

(4) Sofern bei der Auslegung eine wirksame Brandbekämpfung innerhalb von 10 Minuten nach Brandentstehung unterstellt wird, so sind der zeitliche Ablauf der Brandmeldung und Brandbekämpfung bis zu ihrer vollen Wirksamkeit darzustellen.

(5) Sind zusätzliche Anforderungen gemäß Abschnitt 3.1 (6) bei der Auslegung zu berücksichtigen (z.B. Gasdichtigkeit, geringere Temperatur auf der brandabgewandten Seite), so sind diese bei der Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer der Bauteile zugrunde zu legen.

Hinweis: Die Prüfkriterien der DIN 4102 oder Prüfrichtlinien sind entsprechend modifiziert anzuwenden.

(6) Sind zusätzliche Einwirkungen gemäß Abschnitt 3.1 (7) bei der Auslegung zu berücksichtigen, so sind diese bei der Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer der Bauteile zugrunde zu legen.

Hinweis: Auch bei zusätzlichen Einwirkungen infolge Erdbeben ist nur ein Auftreten des Brandes nach dem Ende des Erdbebens zu betrachten. "

Zitatende

Der Textvorschlag für den Anhang von KTA 2101.2 (Stand Oktober 1984) lautet:

A.2.1 Vereinfachte Nachweisverfahren
(Konzept für Anhang 1 von KTA 2101.2)

A.2.1.1 Beurteilung der Brandwirkungen

Bei einer vereinfachten rechnerischen Ermittlung der Brandwirkungen ist wie folgt zu verfahren:

- (1) Bauteile, deren Brandschutzfunktion im wesentlichen von einem Temperaturkriterium bestimmt wird, dürfen anhand einer äquivalenten Normbranddauer t_a beurteilt werden. Die äquivalente Normbranddauer ergibt sich aus der vorhandenen Brandlast, den Ventilationsbedingungen im Brandraum und den Wärmeaufnahmeigenschaften der Umfassungsbau- teile. Einzelheiten hierzu siehe Anlage 1.
- (2) Sofern der zeitliche Ablauf der Temperaturentwicklung von Bedeutung ist (z.B. zur Beurteilung der Funktionsfähig- keit einer stationären Löschanlage zum Zeitpunkt der Aus- lösung), kann der Temperatur-Zeit-Verlauf in Abhängigkeit von Brandlast und Ventilationsbedingungen den Diagrammen in Anlage 2 entnommen werden.
- (3) Wenn die Rauchentwicklung im Brandraum für die Beurteilung der Brandbekämpfungsmöglichkeiten und des Personenschutzes von Bedeutung ist, kann der zeitliche Ablauf der Rauchent- wicklung mit dem Näherungsverfahren in Anlage 3 ermittelt werden.

- (4) Sofern der Druckaufbau in einem abgeschlossenen Brandraum infolge eines Brandes für die Beurteilung des Feuerwiderstandes von Bauteilen von Bedeutung ist (z.B. bei Feuerschutzklappen), darf eine vereinfachte Ermittlung des Druckaufbaues, bei der die Wärmeabgabe durch Konvektion oder Strahlung vernachlässigt wird, erfolgen.

A.2.1.2 Rechnerische Auslegung der bautechnischen Brandschutzmaßnahmen

Bei einer vereinfachten rechnerischen Auslegung der Bautechnischen Brandschutzmaßnahmen ist wie folgt zu verfahren:

- (1) Für die Auslegung der bautechnischen Brandschutzmaßnahmen ist der erforderliche Schutzzumfang nach folgenden Kriterien festzulegen:
- das für die Funktion der Brandschutzmaßnahme maßgebende Prüfkriterium nach DIN 4102 und ggf. nach Abschnitt 3.4,
 - Auftretenshäufigkeit von Bränden in dem betrachteten Raumbereich,
 - Art und Zuverlässigkeit der Brandbekämpfung.
- (2) Die maßgebenden Prüfkriterien sind:
- a) Standsicherheit,
 - b) Temperaturbegrenzung auf der brandabgewandten Seite,
 - c) Raumabschluß,
 - d) Funktionsfähigkeit, z.B. bei Feuerschutzabschlüssen oder -klappen,
 - e) Gasdichtigkeit,
 - f) Abschirmfunktion.

- (3) Für die Auslegung der bautechnischen Brandschutzmaßnahmen sind die gemäß Abschnitt 1 dieses Anhangs ermittelten Brandwirkungen mit einem Sicherheitsbeiwert γ zu erhöhen.
Hinweis: Der Sicherheitsbeiwert γ für das Prüfkriterium Standsicherheit ist in die Tabellen der Anlage 4 eingearbeitet.
(Vorläufige Werte werden in der Dokumentationsunterlage genannt!)
- (4) Für die Prüfkriterien b) bis f) darf der auf das Prüfkriterium Standsicherheit bezogene Sicherheitsbeiwert γ reduziert werden.
Hinweis: Vereinfachend dürfen die in Anlage 4 angegebenen zulässigen Brandlasten auf das Doppelte (vorläufiger Wert) erhöht werden.
- (5) Der für eine mittlere Auftretenshäufigkeit von Bränden (gültig für das Containment, für Kabelverteilungsräume, Schaltanlagenräume u.ä.) festgelegte und in Anlage 1 eingearbeitete Sicherheitsbeiwert γ darf für andere Auftretenshäufigkeiten mit einem Korrekturbeiwert γ_{n_A} modifiziert werden.
Hinweis: Die in Anlage 1 angegebenen zulässigen Brandlasten sind durch den Korrekturbeiwert γ_{n_A} zu dividieren.
- (6) Der Gefahr einer Brandausbreitung mit größeren Brandwirkungen bei verzögerter Brandbekämpfung ist durch einen höheren Sicherheitsbeiwert (Korrekturbeiwert γ_{n_B}) bei der Auslegung Rechnung zu tragen; entsprechend darf bei besonders zuverlässiger Brandbekämpfung durch manuelle oder automatische Auslösung stationärer Löschanlagen innerhalb von 10 Minuten nach Brandentstehung der Sicherheitsbeiwert vermindert werden ($\gamma_{n_B} < 1$).

Hinweis: Die Korrekturbeiwerte γ_{n_A} und γ_{n_B} dürfen zu einem Beiwert $\gamma_n = \gamma_{n_A} \cdot \gamma_{n_B}$ zusammengefaßt werden.
Vorläufige Zahlenwerte für γ_n siehe Tabelle:

Raumbereich *)	Brandbekämpfung				
	manuell			stationär	
	≤10 min	10-20 min	>20 min	≤10 min	automatisch
Dieseldiesengeneratortorräume	1,07	1,21	1,29	1,0	0,91
Containment Kabelräume Schaltanlagenräume	1,0	1,15	1,21	0,93	0,85
Warte, Elektronikräume	0,91	1,06	1,10	0,82	0,73

*) nicht erfaßte Raumbereiche sind sinngemäß zuzuordnen

(7) Für das Prüfkriterium Standsicherheit können die bei unterschiedlichen Feuerwiderstandsklassen der bautechnischen Maßnahmen zulässigen Brandlasten den Tabellen der Anlage 4 entnommen werden.

Hinweis: Die Tabellen gelten für die bei Kernkraftwerken üblichen verschiedenen Brandlasten (Kabel und Öl), den Raumtyp (Verhältnis Oberfläche A_o zu Grundfläche A) und die Ventilationsverhältnisse (Zwangsventilation oder natürliche Ventilation). "

Der Abschnitt 3.4 "Auslegung der bautechnischen Brandschutzmaßnahmen" und der Anhang 1 konnten deshalb noch nicht abschließend beraten werden, weil Mitglieder des KTA-Gremiums ihre Zustimmung von den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens, insbesondere von der Praktikabilität der Nachweisführung abhängig machen.

2.2 Statistische Datenbasis

2.2.1 Überblick

Eine wichtige Voraussetzung für die Beurteilung des erforderlichen Brandschutzes ist die Abschätzung der mit Bränden verbundenen Gefährdung in den verschiedenen Raumbereichen eines Kernkraftwerkes. Neben einer Bewertung der sicherheitstechnischen Aspekte, die nicht Gegenstand dieser Arbeit sind, zählen hierzu Erfahrungen, d.h. statistische Daten, über die Häufigkeit von Entstehungsbränden und die von den vorhandenen aktiven Brandschutzmaßnahmen abhängige Wahrscheinlichkeit für die Ausbreitung eines Entstehungsbrandes auf einen Raumbereich oder darüber hinaus.

2.2.2 Brandentstehungshäufigkeit

Mit der Brandhäufigkeit in Kernkraftwerken beschäftigte sich auch ein Teilprojekt des BMI-Vorhabens SR 144/1 "Optimierung von Brandschutzmaßnahmen und Qualitätskontrollen in Kernkraftwerken" /3/, bei dem auch die Mitarbeiter dieses Vorhabens beteiligt waren. Ausgangspunkt der statistischen Auswertung waren dort - wie auch bei den Vorüberlegungen /1/ - anerkannte Daten zur Brandhäufigkeit in Kernkraftwerken /4, 5, 6/. Diese wurden auf ihre Aussagefähigkeit für deutsche Anlagen hin überprüft und mit den wenigen verfügbaren deutschen Daten verglichen. Die in /3/ erzielten Ergebnisse sind in nachstehender Tabelle 2.1 zusammengefaßt.

Tabelle 2.1: Mittlere jährliche Brandeintrittshäufigkeit für typische Raumbereiche bzw. Gebäude in Kernkraftwerken

Raumbereich bzw. Gebäude	mittlere Brandeintrittshäufigkeit $\bar{\lambda}_1$ [1/a]	95%- Vertrauensgrenze [1/a]
Warte	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Kabel-Verteilungsräume	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Notstromdieselräume	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$
Containment	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Maschinenhaus	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
Hilfsanlagegebäude	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$

Die Zahlenwerte $\bar{\lambda}_1$ in Tabelle 2.1 gelten jeweils für die Summe aller Raumbereiche (Gesamtfläche A_{ges}) einer Kraftwerksanlage mit gleichartiger Nutzung. Für die Bemessung ist hiervon jeweils nur ein bestimmter Raumbereich (Teilfläche A_o) zu betrachten. Die dafür geltende Brandentstehungshäufigkeit λ_1 ergibt sich aus $\bar{\lambda}_1$ - unter Annahme eines gleichmäßigen Risikos innerhalb einer Nutzungsphase - näherungsweise über den Flächenanteil A_o/A_{ges}

$$\lambda_1 = \bar{\lambda}_1 \cdot A_o/A_{ges} \quad [1/\text{Jahr}] \quad (2.1)$$

Alternativ ist eine Wichtung über den globalen Brandgutanteil und die Anzahl von Redundanzen möglich (vgl. Abschnitt 3.3).

2.2.3 Ausfallwahrscheinlichkeit der aktiven Brandschutzmaßnahmen

Auch über die Wirksamkeit der vorhandenen aktiven Brandschutzmaßnahmen bei der Bekämpfung der mit o.g. Häufigkeit λ_1 auftretenden Brände liegen statistische Daten vor. Hier sind es wiederum vorwiegend amerikanische Daten /7, 8/, die aufgrund von Erfahrungen

bei Bränden die Ausfallwahrscheinlichkeit manueller Löschnahmen sowie stationärer Löschanlagen bewerten. Für Löschanlagen gibt es auch umfangreiche Daten beim VdS /9/; sie beziehen sich jedoch durchweg nicht auf (Kern-)Kraftwerke. In der bereits erwähnten BMI-Studie /3/ wurden die deutschen und ausländischen Daten verglichen und bewertet. Unter Berücksichtigung der dort erzielten Ergebnisse werden in Tabelle 2.2 "Rechenwerte" der Ausfallwahrscheinlichkeiten p_2 (manuelle Brandbekämpfung) und p_3 (stationäre Löschanlagen) angegeben, die für deutsche Kernkraftwerke repräsentativ sein dürften.

Abweichende Ausfallwahrscheinlichkeiten für spezielle Löschnahmen dürfen angesetzt werden, sofern sie durch hinreichend verlässliche statistische Daten belegt sind.

2.2.4 Häufigkeit von vollentwickelten Bränden

Unter Voraussetzung der Unabhängigkeit von Brandentstehung und Brandbekämpfung kann aus den o.g. Zahlenwerten λ_1 , p_2 und p_3 die Häufigkeit eines vollentwickelten Brandes im betroffenen Raumbereich ermittelt werden:

$$\lambda_B = \lambda_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \quad [1/\text{Jahr}] \quad (2.2)$$

2.3 Wärmebilanzrechnungen zur Erstellung von Bemessungshilfen

2.3.1 Überblick

Ein wesentliches Ziel des Vorhabens ist die Erarbeitung einfach anzuwendender Bemessungshilfen für brandschutztechnische Nachweise bei typischen Raumbereichen von Kernkraftwerken. Als hinreichend einfaches Nachweisverfahren wurde in /1/ ein Bemessungs-

Tabelle 2.2: Versagenswahrscheinlichkeit der manuellen Brandbekämpfung (p_2) und der Brandbekämpfung durch stationäre Löschanlagen (p_3)

Eingreifzeit/ Auslösung	manuelle Brand- bekämpfung *) p_2	stationäre Löschanlage	
		Art	p_3
später als 10 min nach Brand- entstehung	0,8	Sprühwasser CO ₂	0,4 0,5
innerhalb von 10 min nach Brandentstehung	0,5	Sprühwasser CO ₂	0,2 0,3
innerhalb von 2 min **)	0,2	Sprühwasser CO ₂ Sprinkler	0,1 0,2 0,05

*) bei Zugänglichkeit und gesichertem Angriffsweg für die Feuerwehr

**) bei manueller Brandbekämpfung unmittelbar durch verursachendes Betriebspersonal oder unverzüglich (automatischer) Auslösung von Löschanlagen

Referenzwerte für allgemeine Regelung;
übrige Werte nur im Einzelfall auf Nachweis

verfahren in Anlehnung an die Vornorm DIN 18 230 /10/ ausgewählt. Allerdings weichen die Randbedingungen in Kernkraftwerken von denen in üblichen Industriegebäuden so gravierend ab, daß eine Modifikation des Verfahrens notwendig ist. Dies betrifft vor allem die Einbeziehung von Zwangsventilationen und die von den Ventilationsverhältnissen abhängigen Abbrandraten der wichtigsten Brandgüter Öl und PVC (Kabelisolierungen).

Eine separate Betrachtung von Abbrandverhalten und Ventilation (Faktoren m und w der DIN 18 230) erscheint hier nicht mehr akzeptabel. Daher wird zunächst der funktionale Zusammenhang zwischen spezifischer Abbrandrate (R_{sp}) und Ventilation untersucht. Als Maß für die Ventilation dient bei natürlicher Ventilation durch Öffnungen das mit der Wurzel der Öffnungshöhe h gewichte Verhältnis von Öffnungsfläche A_w zu Raumboberfläche A_t ; bei Zwangsventilation wird das Produkt von Luftwechsel m_z und dem Verhältnis Raumvolumen V zu Raumboberfläche A_t verwendet. Es wird davon ausgegangen, daß, sofern eine Proportionalität zwischen den beiden definierten Ventilationsmaßen nicht abgeleitet werden kann, die Bemessungshilfen für den Fall der natürlichen Ventilation und der Zwangsventilation jeweils gesondert bestimmt werden.

2.3.2 Grundlagen der Wärmebilanzrechnung

Die Parameterstudie wird durchgeführt mit einem an der Universität Kassel entwickelten Wärmebilanzprogramm für Vollbrände in Räumen mit natürlicher oder erzwungener Ventilation. Im folgenden sind die physikalischen Grundlagen des Programms kurz beschrieben.

Das hier zugrundeliegende Problem eines gekoppelten Wärme- und Stofftransports infolge eines Brandes, wurde erstmalig in den 50er Jahren von Kawagoe, Japan, theoretisch behandelt. Ein von Kawagoe damals entwickeltes Wärmebilanzmodell für kleine Räume

enthielt bereits alle wesentlichen Parameter, die auch heute noch zur Anwendung gelangen. Die Studie ist eine Pionierarbeit, wenngleich die damals fehlende Rechenkapazität der praktischen Anwendung deutliche Grenzen gesetzt hat. In Deutschland wurde das Problem erstmalig in den 70er Jahren von Schneider/Kordina aufgegriffen.

Für die Energiebilanz in einem Brandraum ergibt sich im quasi-stationären Fall aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik:

$$\dot{h}_c - (\dot{h}_l + \dot{h}_w + \dot{h}_o + \dot{h}_g + \dot{h}_s) = 0 \quad (2.3)$$

Folgende Energieterme sind darin enthalten:

\dot{h}_c - die pro Zeiteinheit durch Verbrennung im Brandraum freigesetzte Energie,

\dot{h}_l - die durch Gasströmungen (Konvektion durch Öffnungen) dem Brandraum entzogene Energie,

\dot{h}_w - die durch Konvektion und Strahlung an die Bauteile (Wände, Decken, Fußböden) abgegebene Energie,

\dot{h}_o - die durch Strahlung aus dem Fenster verlorene Energie,

\dot{h}_g - die in den Brandgasen im Brandraum gespeicherte Energie,

\dot{h}_s - die durch Löschmaßnahmen dem Brandraum entzogene Energie.

Nach Einsetzung der entsprechenden physikalischen Beziehungen in die einzelnen Energieterme erhält man eine Funktion

$$F = F(T_g, T_w, m_l) \quad (2.4)$$

in der die Brandraumtemperatur T_g , die Bauteiloberflächentemperatur T_w und der Frischluftstrom m_l als unbekannte Größen auftreten.

Die Bauteiltemperaturen werden mit der Fourierrechnung berechnet. Man erhält eine Funktion der Form

$$U = U (T_g, T_w), \quad (2.5)$$

in der T_g und T_w als Unbekannte auftreten.

Die zugehörige Gleichung der Massenbilanz im Brandraum ist durch

$$\dot{m}_g - (\dot{m}_l + \dot{R} + \dot{m}_w) = 0 \quad (2.6)$$

gegeben. Darin bedeutet:

\dot{m}_g - Masse der aus dem Brandraum strömenden Brandgase,

\dot{m}_l - Masse der in den Brandraum einströmenden Luft,

\dot{R} - Masse der verbrennenden Materialien (Abbrandgeschwindigkeit),

\dot{m}_w - Masse der verdampfenden Löschwassermenge (wurde in der Parameterstudie nicht benötigt).

Die obige Gleichung läßt sich umformen, so daß sich die Funktion

$$M = M (\dot{m}_l, T_g) \quad (2.7)$$

ergibt, in der die Luftmenge und die Brandraumtemperaturen die Unbekannten sind.

Die oben angegebenen Funktionen F , U und M sind für jeden Zeitpunkt des Brandgeschehens zu lösen, so daß die beiden gesuchten Temperaturen und der Frischluftstrom berechnet werden können. Naturgemäß kann dies nur numerisch, d.h. mittels einer leistungsfähigen Rechenanlage erfolgen. Dabei wird i.a. so vorgegangen,

daß man die Funktionen in Zeitabständen von 1 bis 10 Sekunden löst, wobei eine nach Cranston benannte Lösungsprozedur zur Anwendung kommt. Die Fourierreihe wird in einem getrennten Rechenschritt, mittels einer sogenannten expliziten Lösungsprozedur gelöst. Dieses ist im vorliegenden Fall deshalb möglich, weil die Zeitschrittintervalle im Sekundenbereich liegen. Auf die Beschreibung der einzelnen mathematischen Schritte kann hier verzichtet werden, weil sich daraus keine praktisch verwertbaren Hinweise für die Güte des physikalischen Brandmodells ableiten lassen. Die Rechenprozedur ist jedoch vergleichsweise effektiv, so daß das Rechenprogramm seit kurzem auch auf PC's betrieben werden kann. Die Rechendauern liegen allerdings in der Größenordnung der tatsächlichen Branddauern oder geringfügig darunter.

2.3.3 Abbrandmodelle

Die wichtigsten Brandgüter in den Raumbereichen von Kernkraftwerken sind Öle verschiedenster Art und PVC, primär von Kabelisolierungen herkömmlicher Art. Obgleich gerade diese beiden Brandgüter von ihrem Anteil her bei Kernkraftwerken ständig reduziert werden, stellen sie noch immer das größte Brandpotential dar. Aus diesem Grunde wurde ihnen auch in dem BMI-Vorhaben SR 144/1 /9/ besondere Beachtung geschenkt. Die in diesem Zusammenhang durchgeführte klein- und großmaßstäblichen Brandversuche liefern wertvolle Informationen für die Entwicklung wirklichkeitsnaher Abbrandmodelle. Im folgenden werden die entwickelten Modelle für Öl- und Kabelbrände kurz beschrieben. Eine ausführliche Veröffentlichung dieser Arbeiten in einer Brandschutzzeitschrift o.ä. ist in Vorbereitung.

Ölbrand

In den Abbrandmodellen für den Ölbrand wird grundsätzlich davon ausgegangen, daß das Öl sofort nach der Zündung auf der gesamten Oberfläche der Ölwanne oder der Lache brennt. Die Ausbreitung des Öls ist nach der Zündung durch die hohe Geschwindigkeit kaum erfaßbar; die Annahme des sofortigen vollflächigen Brandes ist daher als rechentechnische Vereinfachung zu betrachten.

In den vorliegenden Versuchsergebnissen der TU Braunschweig wurden minimale Abbrandraten zwischen 1.0 und 1.5 kg/m² min. gemessen, die maximalen Abbrandraten lagen knapp über 3.0 kg/m² min (Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3: Gemessene Abbrandraten und ϕ -Werte der Ölversuche, Versuchsreihe A

Versuch	Temperatur (°C)	Abbrandrate (kg/m ² min.)	ϕ -Werte (-)
A 1	900	1.35	0.96
A 2	1150	3.0	0.78
A 3	950	1.35	0.96 Wanne
	1250	2.15	1.53 Zulauf
A 4	900	1.65	0.85 Wanne
	1100	2.5	0.85 Zulauf
	1200	3.15	0.85 Zulauf

Anhand der gemessenen Temperaturverläufe und der gegebenen Randbedingungen der Versuche wurden die Meßpunkte nochmals überprüft. Dabei traten Unstimmigkeiten auf, wenn die angegebenen maximalen Abbrandraten mit der Branddauer verglichen wurden.

- Bei dem Versuch A 1 wurde die Maximaltemperatur nach 11 Minuten erreicht. Bei einer angenommenen Abbrand von 90 % bis zu diesem Zeitpunkt müßte die Abbrandrate ca. 1.6 kg/m² min. betragen haben, der ϕ -Wert errechnete sich dann zu 1.13. Die repräsentative Brandraumtemperatur lag bei 750°C. Angegeben war eine Abbrandrate von 1.35 kg/m²min. und ein ϕ -Wert von 0.96.

- Im Versuch A 2 wurde die Maximaltemperatur von ca. 1100 °C (Meßstelle 31) nach 14 Minuten erreicht. Bei 90 % Abbrand läge die mittlere Abbrandrate bei 2.2, die maximale Abbrandrate bei 2.7 kg/m² min.. Bei einer zusätzlichen natürlichen Ventilation von ca. 0.45 kg/sec. (aus den vorigen Rechnungen ermittelt, bei den Nachrechnungen dann bestätigt) stellte sich ein ϕ -Wert von ca. 1.1 ein. Angegeben war eine Abbrandrate von 3.0 kg/m² min. und ein ϕ -Wert von 0.78.

- Im Versuch A 3 wurde für den Wannenbrand bei einer Branddauer von 12 Minuten, Temperaturen von ca. 850 °C und 100 %igem Abbrand eine Abbrandrate von ca. 1.75 kg/m² min. (angegeben 1.35) und daraus ein ϕ -Wert von 1.25 (angegeben 0.96) errechnet. Der Zulauf in die Ölwanne ergab bei 13 Minuten Branddauer und Temperaturen um 1250 °C eine Abbrandrate von 2.3 kg/m² min. (angegeben 2.15) und einen ϕ -Wert von 1.61 (angegeben 1.53).

- Beim Versuch A 4 wurde bei Temperaturen um 850 °C und einer Dauer des Wannenbrandes von 9 Minuten eine Abbrandrate von 2.35 kg/m² min. (angegeben 1.65) errechnet. Die Luftzufuhr aus der natürlichen Ventilation betrug ca. 0.45 kg/sec.; daraus errechnet sich der ϕ -Wert zu 0.96 (angegeben 0.85). Bei Temperaturen von 1000 °C verbrannten am Zulauf bei einer Branddauer von 15 Minuten im Mittel 5 kg/m² min.. Dies ergibt bei ungefähr gleicher Luftzufuhr aus natürlicher Ventilation einen stöchiometrischen Verbrennungsfaktor von 1.02 (angegeben 0.78).

Aus diesen Punkten konnte ein allgemeines Abbrandmodell für den Ölbrand konstruiert werden. Unter der Annahme, daß die Abbrandrate nur bei ϕ -Werten unter 1 temperaturabhängig ist, ließ sich das in Tabelle 2.4 zusammengefaßte Modell aufstellen. Unter ϕ ist darin das Verhältnis von stöchiometrisch erforderlicher Luftmenge : tatsächlich vorhandener Luftmenge zu verstehen.

Tabelle 2.4: Abbrandmodell für Ölbrandlasten

ϕ -Werte (-)	Temperaturen (°C)	Abbrandraten (kg/m ² min.)
≤ 1	≤ 400	1.0
≤ 1	> 400	$1.0 + (T_g - 400) \cdot 0.0025$
> 1	≤ 400	1.0
> 1	> 400	$1.0 + (T_g - f_1) \cdot 0.0025$

Dieses Modell lieferte bei allen 4 Versuche die besten Ergebnisse im Vergleich zwischen den Meßwerten und den errechneten Werten. Die Temperaturverläufe sowie die Abbrandraten liegen im Bereich der Versuchsergebnisse.

Die Temperaturkurven der Nachrechnungen liegen bei allen 4 Versuchen weitgehend zwischen den Temperaturkurven der Meßstelle 31 (Raummitte in 2.40 m Höhe) und den an verschiedenen Punkten ermittelten Maximaltemperaturen. Bei den Versuchen A 1 und A 2 (Ölbrände in einer Wanne) wurden auch die Branddauern der Versuche recht genau bestimmt. Dabei ist auch von Bedeutung, daß im Programm nach Erreichen von 80 % des Abbrandes die Abbrandfunktion vom Höchstwert mit einer Exponentialfunktion abnimmt. Dies scheint mit den Versuchen recht gut übereinzustimmen, da auch die Temperaturkurven nach dem Überschreiten der Maximaltemperatur sehr ähnlich verlaufen.

Kabelbrand

Um die vorliegenden Versuchsergebnisse möglichst gut zu erfassen, wurde für Kabelbrände ein völlig neues Ausbreitungsmodell aufgestellt. Der Grundgedanke dieses Modells liegt darin, die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der einströmenden Luft analytisch zu erfassen. In den Versuchen war festgestellt worden, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf der Kabeltrasse stark ansteigt, wenn die Luftzufuhr in Brandausbreitungsrichtung zunimmt.

Auch bei einer Erhöhung der Luftzufuhr diagonal im Raum (schräg entgegen der Brandausbreitungsrichtung) stieg die Ausbreitungsgeschwindigkeit an. Daraus wurde folgendes Modell konstruiert:

Bei Zwangsventilation werden die Luftströme vektoriell addiert. Über diese Vektoraddition wird die Richtung des resultierenden Luftstroms zur Brandausbreitungsrichtung bestimmt. Der vorwärtstreibende Luftstrom errechnet sich aus der Summe der einzelnen Luftströme multipliziert mit dem Cosinus des halben resultierenden Einströmwinkels.

Bei natürlicher Ventilation errechnet sich der resultierende Luftstrom aus der Lage der Öffnungen zum Schwerpunkt der Kabelpritschen. In diesem Fall werden die Breiten der Öffnungen als Länge der Vektoren und die Winkel zwischen den Mitten der Fenster und dem Schwerpunkt der Kabelpritschen in Ausbreitungsrichtung als Richtung der Vektoren betrachtet. Mit Hilfe einer Vektoraddition wird die Richtung des resultierenden Luftstroms bestimmt. Der im Programm errechnete Luftstrom wird mit dem Cosinus des halben resultierenden Einströmwinkels multipliziert und als vorwärtstreibender Luftstrom interpretiert. Bei unterschiedlichen Fensterhöhen und unterschiedlicher Lage der Öffnungen muß die Lage der Nulllinie abgeschätzt werden und bei der Vektoraddition berücksichtigt werden. Der vorwärtstreibende Luftstrom wird bestimmt zu:

$$\dot{m}_1^* = \dot{m}_1 \cdot \cos(\alpha/2) + \dot{m}_2 \cdot \cos(\beta/2) \quad (2.8)$$

α = Einströmwinkel für natürliche Ventilation (°)

β = Einströmwinkel für Zwangsventilation (°)

Die Brandausbreitungsgeschwindigkeit errechnet sich zu:

$$V_K = K_1 + K_2 \cdot \dot{m}_1^{*2} \leq 5,0 \text{ m/min} \quad (2.9)$$

mit

\dot{m}_1^* in kg/s

Das Modell gilt für horizontale und vertikale Kabeltrassen.

Nach dem Aufstellen des neuen Ausbreitungsmodells wurde auch das Abbrandmodell geändert.

$$R_{sp} = \begin{cases} 0,5 & \text{für } 0 \leq T_g \leq 300^\circ\text{C} \\ 0,5 + (T_g - 300) \cdot 0,002 & \text{für: } T_g > 300^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2.10)$$

mit der Nebenbedingung

$$R_{sp} \leq 2,5 \text{ kg/m}^2 \text{ min.}$$

Mit diesem Abbrandmodell und dem geänderten Ausbreitungsmodell wurden Nachrechnungen durchgeführt. Diese führten in der Regel zu guten Ergebnissen bei den nachgerechneten Versuchen. Ähnliche Ergebnisse brachte eine Variation des Abbrandmodells. Dabei wurde eine Mindestabbrandrate von $0.8 \text{ kg/m}^2 \text{ min.}$ angenommen. Ebenfalls variiert wurden die Beziehungen zwischen der Temperatur und der Abbrandrate in Anlehnung an das genannte Modell, wobei die maximale Abbrandrate bei einer Temperatur von ca. 1200°C erreicht wird.

Obwohl alle Versuchsergebnisse mit diesem Modell gut nachgerechnet werden konnten bleibt zu wünschen, daß dieses Abbrandmodell durch weitere Versuche abgesichert wird. Bei diesen Versuchen sollte der Strömungsvektor der um die Trasse strömenden Frischluft meßtechnisch erfaßt werden.

2.3.4 Umfang der Parameterstudie

In der Parameterstudie war das Wärmebilanzprogramm auf Räume mit Öl- und Kabelbrandlasten systematisch anzuwenden. Es waren die Temperatur-Zeit-Verläufe, die Abbrandfunktionen, die stöchiometrischen Verbrennungsfaktoren sowie die äquivalenten Branddauern zu ermitteln und in geeigneter Weise darzustellen.

Die variierten Parameter innerhalb der Parameterstudie sollen folgende Werte sein:

- Die gesamte Oberfläche des Brandraums A_t .
- Die spezifische Brandlast (in Abhängigkeit von der Oberfläche des Brandraums).
- Die Anzahl der Luftwechsel pro Stunde bei erzwungener Ventilation.
- Das Ventilationsverhältnis $A_w \sqrt{h}/A_t$ bei vorhandener natürlicher Ventilation.

Im einzelnen wurden folgende Parameterbereiche untersucht (Tabelle 2.5)

Tabelle 2.5: Eckwerte der Parameterstudie

Brandraumoberfläche A_t [m ²]	Ventilationsverhältnis $A_w \sqrt{h}/A_t$ [m ^{1/2}]	Luftwechsel L_w [1/h]	Brandlast Q/A_t [10 ⁶ kJ/m ² A _t]
Räume mit Ölbrandlasten			
100	0.01	1.0	0.1
250	.	.	0.5
1000	.	.	2.0
	0.30	200.0	5.0
Räume mit Kabelbrandlasten (horizontal)			
100	0.005	1.0	0.02
250	0.010	2.0	0.06
1000	0.030	10.0	0.18
	0.100	25.0	0.50
Räume mit Kabelbrandlasten (vertikal)			
50	0.01	1.0	0.02
100	.	.	.
250	0.10	25.0	0.50

Insgesamt waren 186 Rechenläufe mit Ölbrandlasten und 78 Läufe mit Kabelbrandlasten erforderlich. Die Rechenergebnisse wurden in Form von Tabellen und Plots ausgegeben. Die Bilder 2.1 bis 2.7 zeigen das Rechenergebnis für einen typischen Ölbrand.

2.3.5 Ölbrände

Die Ergebnisse der Parameterrechnungen sind in Bild 2.8 für natürliche Ventilation und in Bild 2.9 für Zwangsventilation dargestellt. Die beiden Bilder sind bewußt mit unterschiedlichen Abzissenmaßstäben versehen, um die prinzipiell unterschiedlichen Möglichkeiten für die praktische Anwendung aufzuzeigen. Weiterhin wird deutlich, daß die Berechnungen auch Extremfälle abdecken ($t_{\text{ä}} > 240 \text{ min}$), die in der Praxis nicht zu erwarten sind. Für die endgültige Auswertung werden vorläufig Q/A_t -Werte von $< 500 \text{ MJ/m}^2$ und bezogene Zwangsluftraten $L_w \cdot V/A_t$ von < 18 als praktisch vorkommende Grenzwerte zugrundegelegt.

Es muß in diesem Zusammenhang erwähnt werden, daß die vorliegenden Berechnungen ohne Wärmesenken, die z.B. durch die Wärmeabsorption großer Ölbehälter entstehen, durchgeführt wurden. Dadurch ergeben sich i.a. sehr konservative Werte. Allerdings ist der Fall eines möglichen Siedens nach sehr langen Branddauern ebenfalls nicht erfaßt /9/.

2.3.6 Kabelbrände

In den Bildern 2.10 und 2.11 sind für natürlich und zwangsbelüftete Kanäle die äquivalenten Branddauern in Abhängigkeit vom Ventilations- und Brandlastfaktor dargestellt. Die Bilder 2.12 und 2.13 bilden die Rechenergebnisse in der gleichen Weise für die Kabelschächte ab. Es kann wieder festgestellt werden, daß für die praktische Anwendung vorläufig vorgeschlagen wird, die bezogene Brandlast auf 500 MJ/m^2 zu begrenzen. Das von der Parameterstudie abgedeckte Spektrum bis zu etwa 30-fachen $L_w \cdot V/A_t$ Werten entspricht durchaus dem in der Praxis realisierbaren Bereich. Den Untersuchungen lagen Volumen-Oberflächenverhältnisse V/A_t von etwa 0,6 zugrunde. Das würde eine Zwangsventilation mit 18-fachem Luftwechsel bedeuten. Innerhalb dieses Bereiches bleibt die äquivalente Branddauer unter 240 min.

Bei den Berechnungen wurde immer davon ausgegangen, daß die Brandlast gleichmäßig auf 4 Pritschen verteilt ist. Bei Vergleichsrechnungen mit einer größeren Pritschenanzahl ergaben sich durchweg niedrigere äquivalente Branddauern. Eine niedrigere Pritschenanzahl würde eine Erhöhung der Ergebnisse bedeuten, wobei dies in der Praxis allerdings wegen der begrenzten Belegungsdichte der Pritschen nur im Bereich sehr kleiner Brandlasten in Frage kommen kann, die für die praktische Bemessung nicht relevant sind.*)

2.3.7 Auswertung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, ob die Ergebnisse der Öl- und Kabelbrandberechnungen durch vereinfachte Näherungsbeziehungen beschrieben werden können. Nach den bisher vorliegenden Erfahrungen ist dieses nicht möglich. Vor allem läßt der sehr weit gefaßte Parameterbereich solche Vereinfachungen nicht zu. Für das in Frage stehende Bemessungskonzept erscheint es deshalb sinnvoll und zweckmäßig zunächst nur die berechneten Diagramme (Bild 2.9 bis 2.14) zu verwenden.

Die Rechenergebnisse deuten allerdings darauf hin, daß eine Unterscheidung zwischen horizontalen und vertikalen Kabeltrassen nicht erforderlich ist, wenn man ungünstig annimmt, daß die Ventilation in den horizontalen Kanälen immer längs der Trasse erfolgt.

*) Das verwendete Abbrandmodell bezieht sich ausschließlich auf das Verhalten von PVC-Kabeln. Über FRNC-Kabel liegen hinreichende Versuchserfahrungen nicht vor. Bei Vorhandensein eines Stützfeuers brennen FRNC-Kabel vollständig ab.

C7GL1447

12.03.86

193205

C I122-09

PARAMETERSTUDIE

***VERSUCH DEL N 7/ 7/ 2

KASSEL, 12.03.86

AT= 250 M2 BRLA= 75E6 KJ VERH=0.10 M**.*5

BERECHNET MIT PROGRAMM F A L S Z 1 VERS. 08.85

WAERMEBILANZ BERECHNUNG

HALLENABMESSUNG HOEHE	HIA=	3.6780	[M]
HALLENVOLUMEN	WOG=	229.8865	[M3]
OBERFLAECHE DES RAUMES	AT+AW+AWW+ASTA=	250.0582	[M2]
FENSTERFLAECHE	AW=	17.6780	[M2]
FENSTERHOEHE	HD=	2.0000	[M]
EINSTREIFENFLAECHE / OBERFLAECHE	AW*H**0.5/AT=	0.1000	[M**0.5]
GESAMTBRANDLAST	GBRLA=	1781.0000	[KG]
SPEZIFISCHE BRANDLAST	GBRLA/AT=	0.3000	[E6 KJ/M2]
UNTERER HEIZWERT	DIIC=	11.7000	[KWH/KG]
KG LUFT PRO KG BRENNST. (STOE. VERBR.)	R=	13.0000	[-]
ZWANGSLUFT	HZ=	0.0	[-]
ZWANGSLUFT=CONST.	MCZ=	0.0	[KG/SEC]
LUFTWECHSEL JE STUNDE ...-FACH	=	0.0	[1/H]

GEWAHLT: MODELL DELBRAND, RSP1=F(PHI,TB)

WANDMATERIAL: GASBETON

ZEIT	BRANDRAUM-TEMPERATUR	WANDINNEN-TEMPERATUR	O2-GEH.	STOECH. ABGAS VERBR.	FAKT	LUFTZUFUHR	ABBRAND	ABGAS
[MIN]	[GRAD C]	[GRAD C]	[VOL- %]	[-]	[-]	[KG/S]	[KG/S]	MENGE
=====								
2.0	455.2	307.2	15.2257	0.2571		13.1701	0.2604	13.4299
4.0	936.3	797.0	7.6295	0.6176		12.5276	0.5952	13.1236
6.0	1121.1	1022.8	4.4536	0.7742		12.1431	0.7232	12.8665
8.0	1221.0	1149.7	2.7312	0.8607		11.9345	0.7901	12.7253
10.0	1298.3	1244.3	1.3831	0.9291		11.7762	0.8416	12.6160
13.0	1378.4	1339.2	0.0	1.0025		11.6119	0.8955	12.5061
16.0	1404.0	1373.3	0.0	1.0207		11.5623	0.9078	12.4700
20.0	1419.0	1393.6	0.0	1.0308		11.5350	0.9146	12.4481
25.0	1430.4	1409.3	0.0	1.0386		11.5126	0.9197	12.4324
30.0	1438.3	1419.9	0.0	1.0440		11.4967	0.9233	12.4219
34.3	1126.1	1127.8	10.0977	0.4983		12.2928	0.7712	12.7625

MAXIMALWERTE

34.2	1439.0	1420.7	20.9000	1.0442		13.1747	0.9234	13.4720
------	--------	--------	---------	--------	--	---------	--------	---------

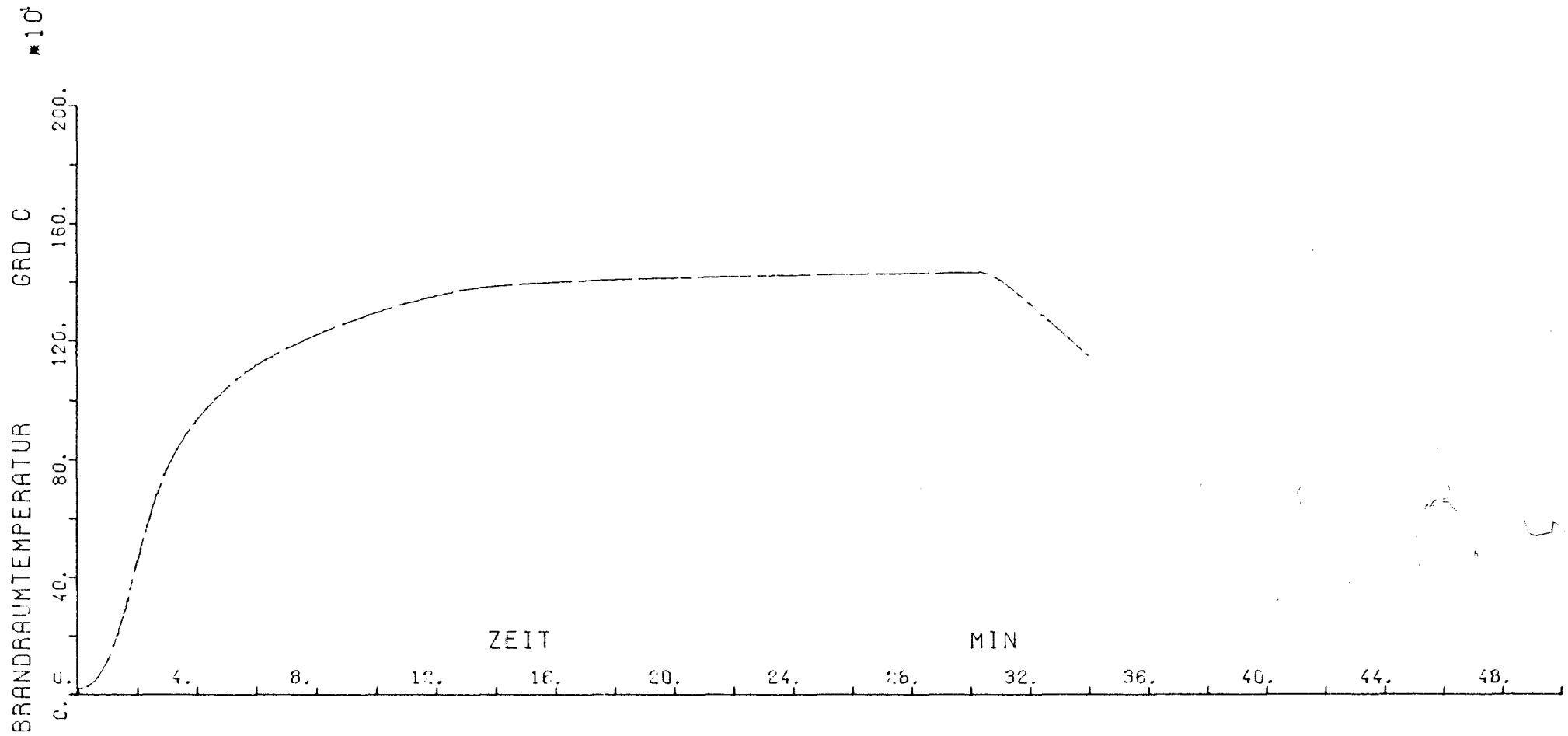
BERECHNUNG DER AEQUIVALENTEN BRANDDAUER

MAX. TEMP.	IN MIN.	EQ. ZEIT
441.18	34.17	83.27

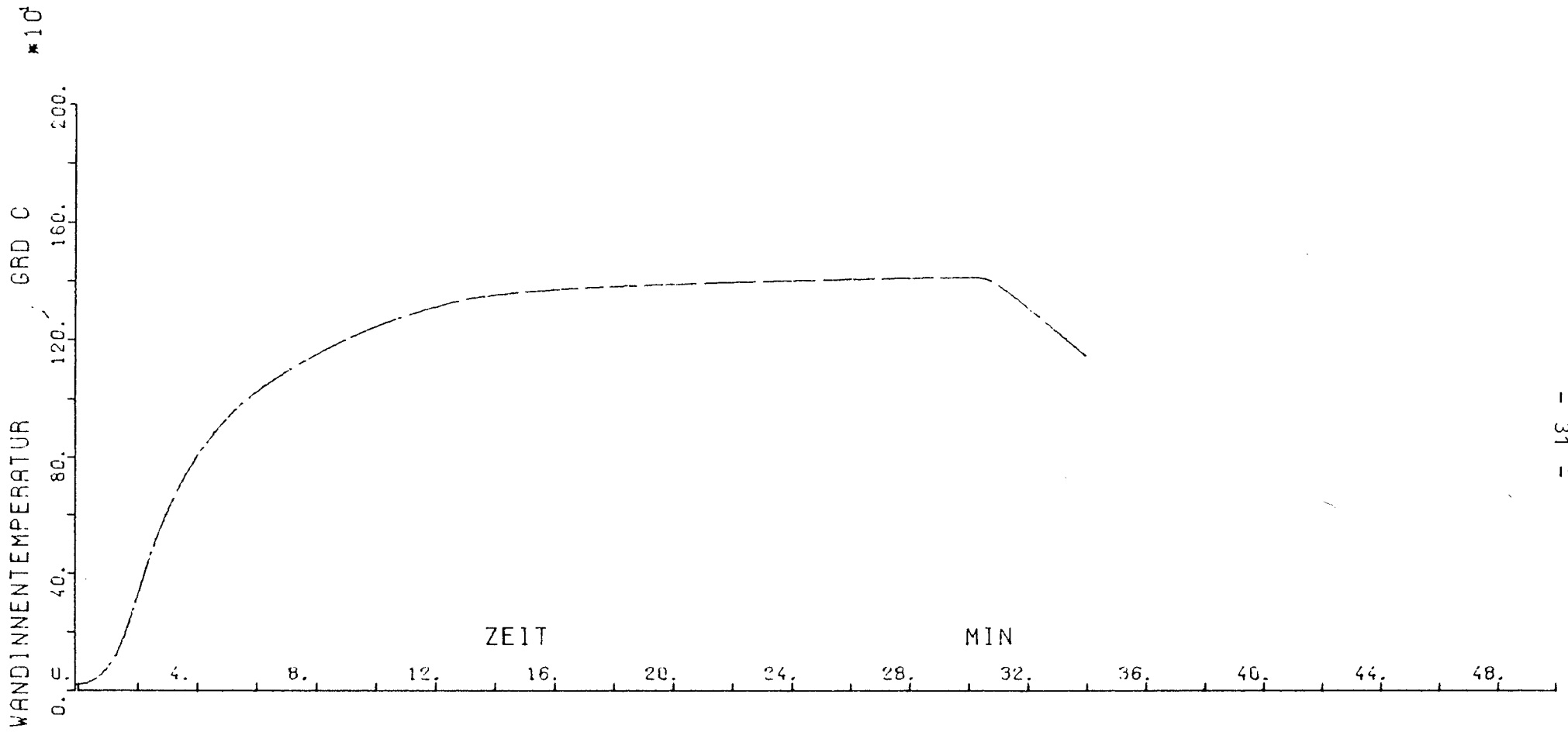
Bild 2.1: Computerausdruck mit den wichtigsten Eingabewerten und Ergebnissen der Waermebilanzrechnung

VERSUCH OEL N 7/ 7/ 2

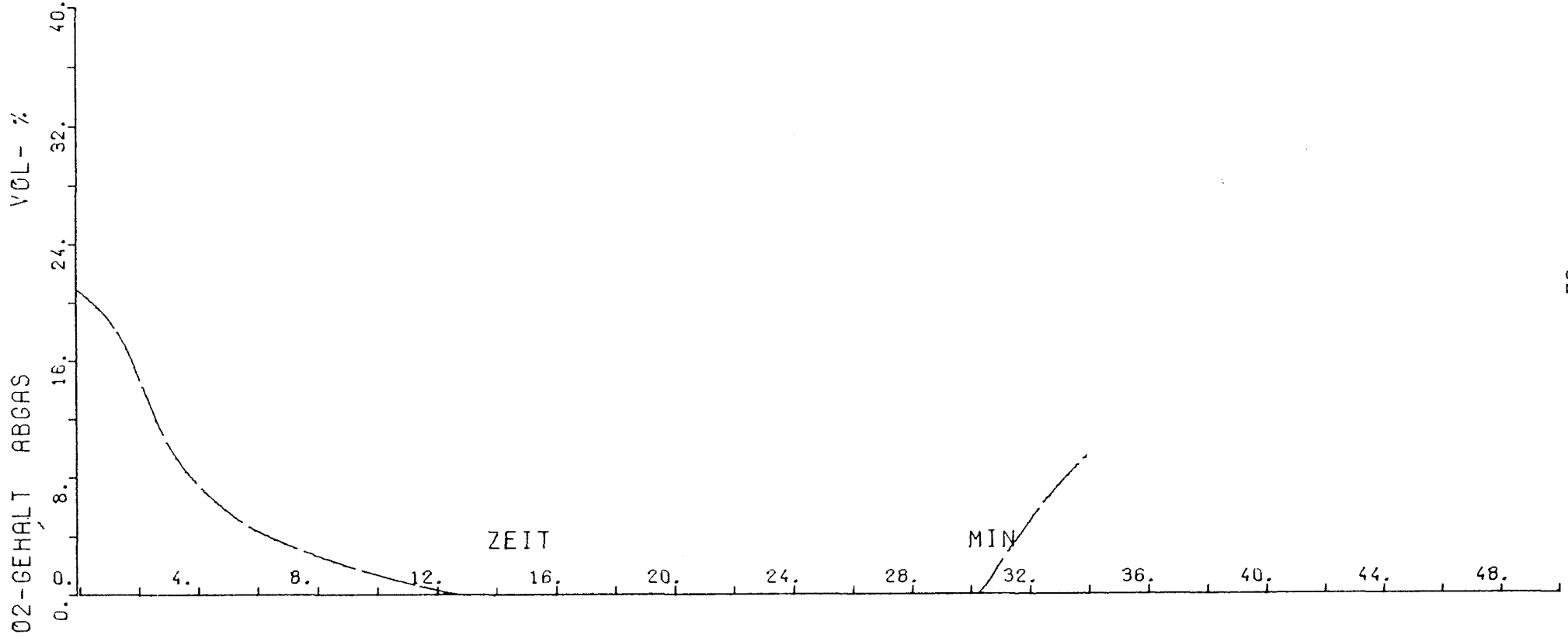
Bild 2.2: Zeitlicher Verlauf der Brandraumtemperatur



----- AT= 250 M2 PALA= 75EC KJ VERH=0.10 M**5



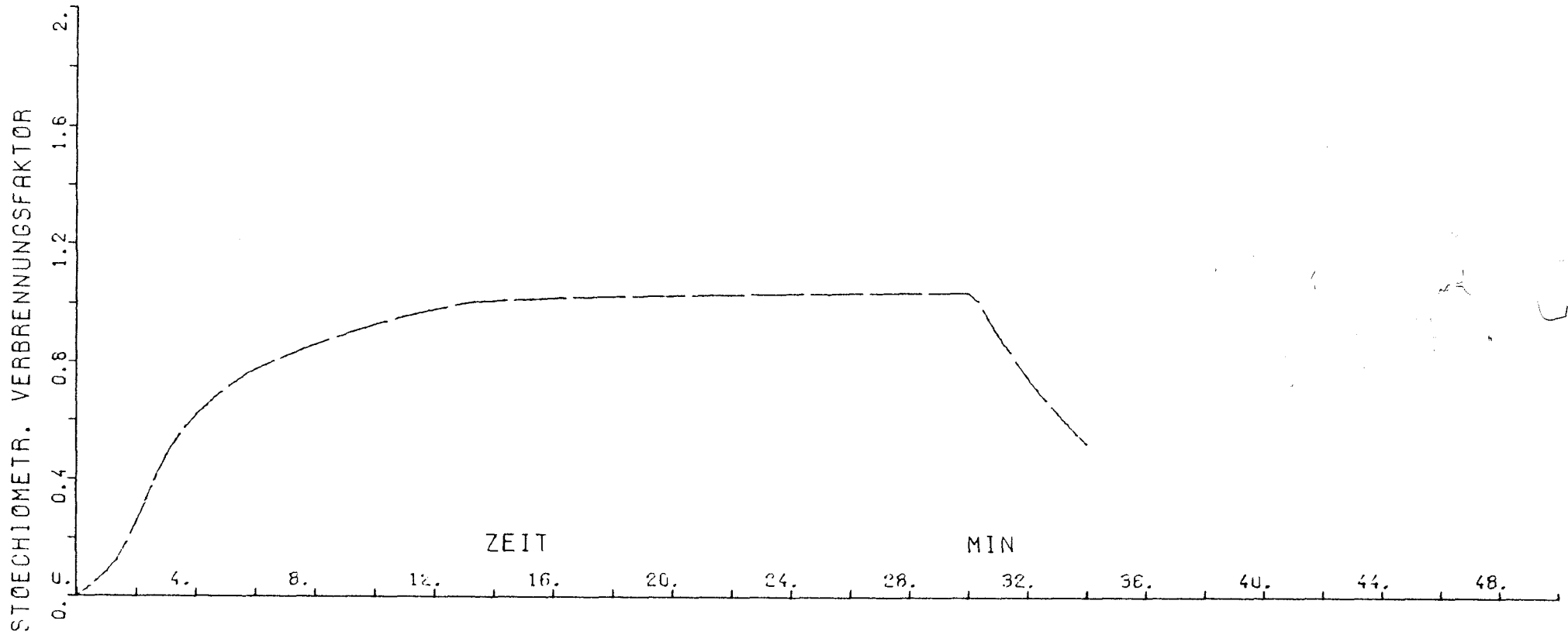
AT= 250 M2 BALA= 7566 KJ VERH=0.10 M...S



----- AT= 250 M2 ØALA= 75E6 KJ VERH=0.10 M**5

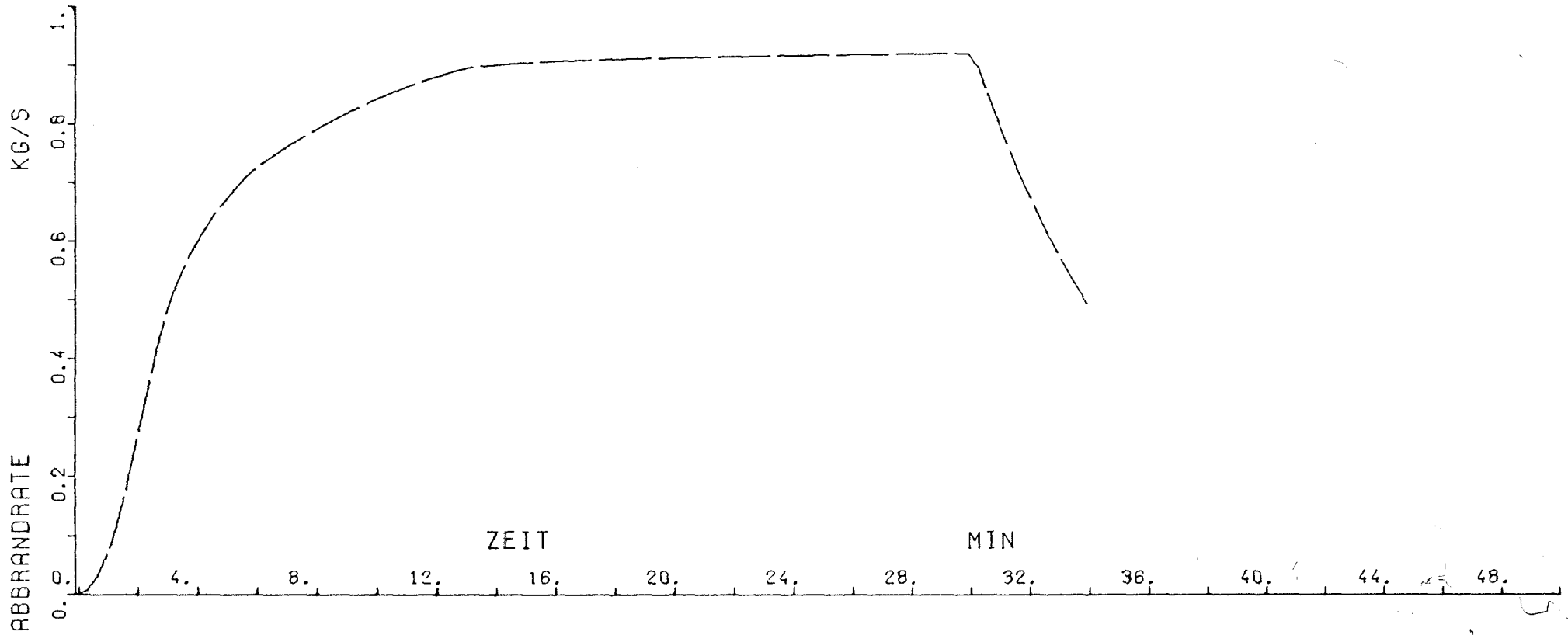
VERSUCH OEL N 7/ 7/ 2

Bild 2.5: Zeitliche Entwicklung des stöchiometrischen Verbrennungsfaktors ϕ



HT= 250 MZ BRLA= 75EE KJ VERH=0.10 M**..5

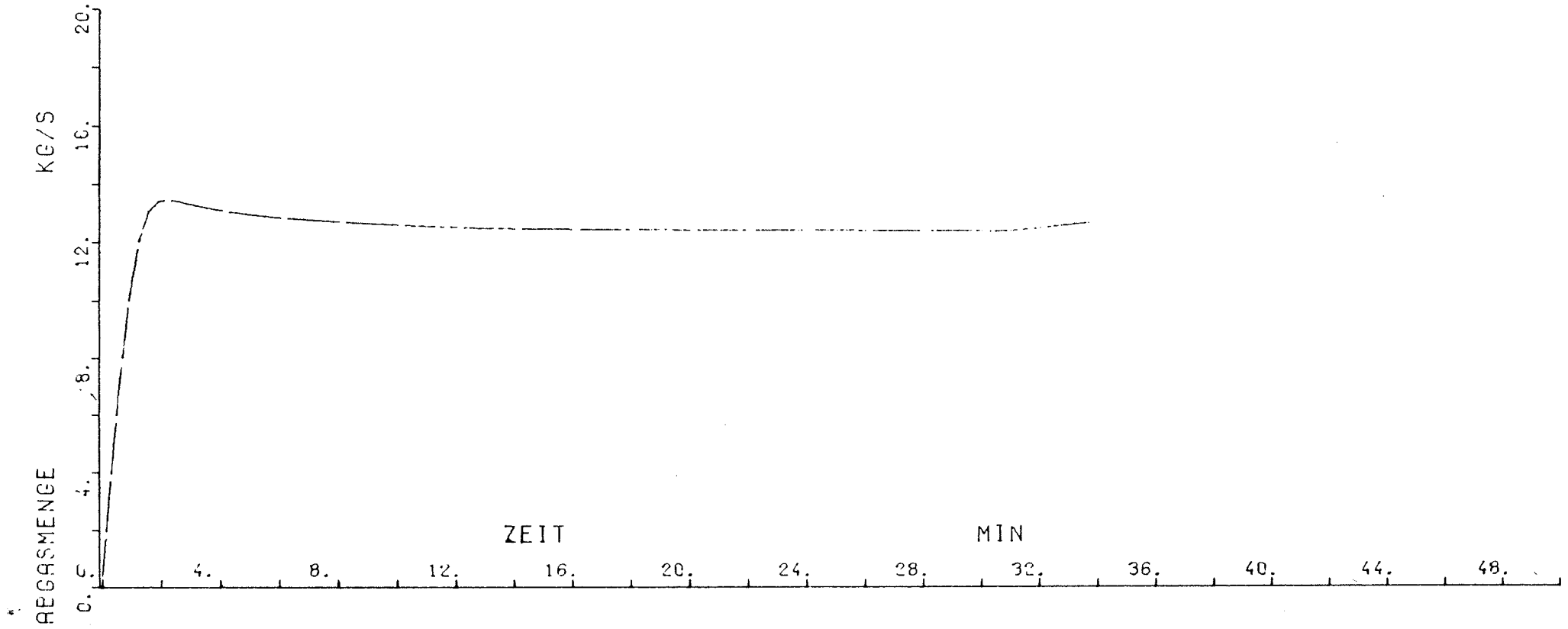
33



AT= 250 M2 BRILA= 75E6 KJ VERH=0.10 M**5

VERSUCH OEL N°7/ 7/ 2

Bild 2.7: Die Ausbildung der Abgasmengen im zeitlichen Verlauf



AT= 250 M2 BRLH= 75EG KJ VERH=0.10 M**5

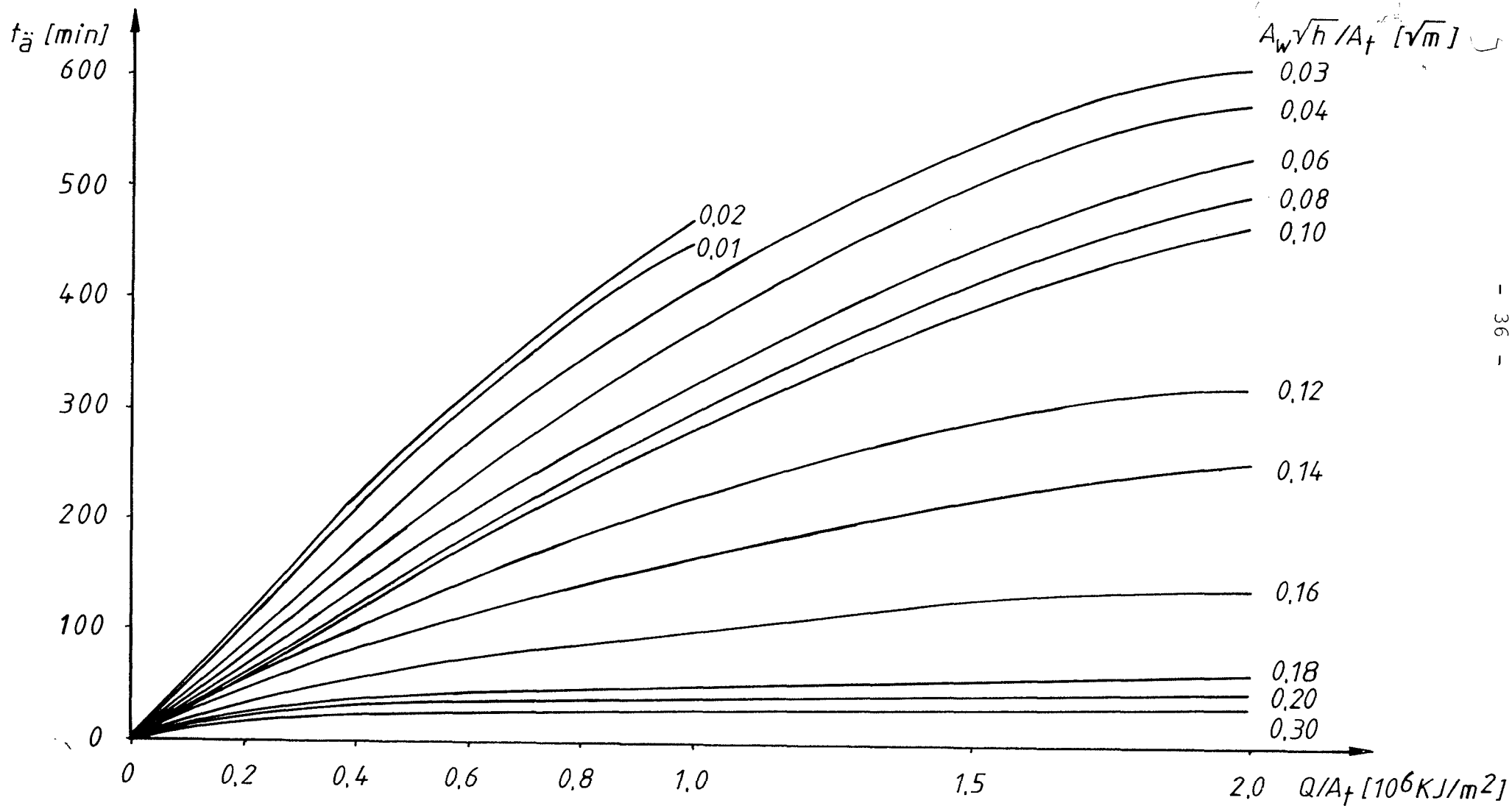


Bild 2.8: Äquivalente Branddauer bei Ölbränden in Räumen mit natürlicher Ventilation
 Grundlage: 86 Programmläufe

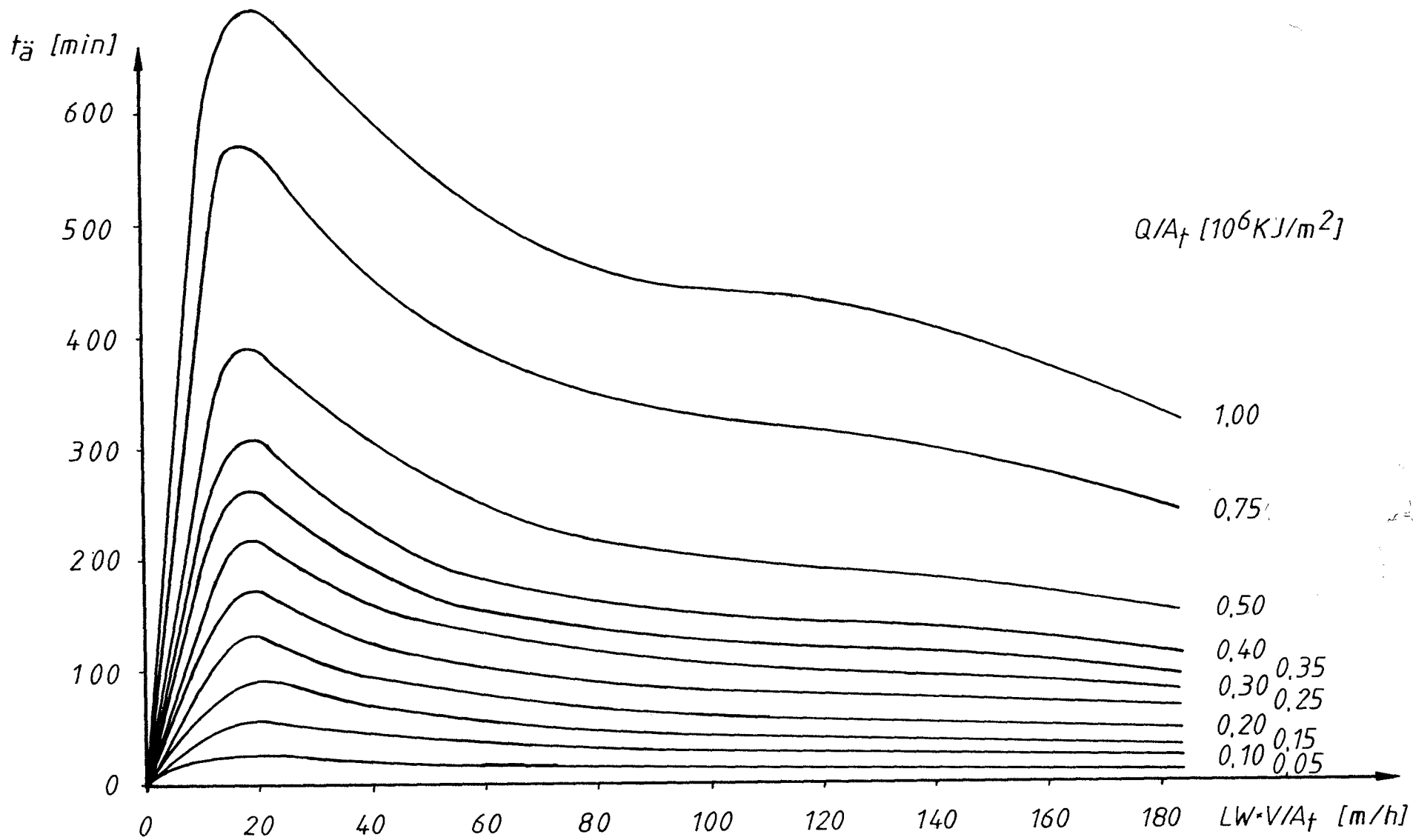


Bild 2.9: Äquivalente Branddauer bei Ölbränden in Räumen mit erzwungener Ventilation
 Grundlage: 95 Programmläufe

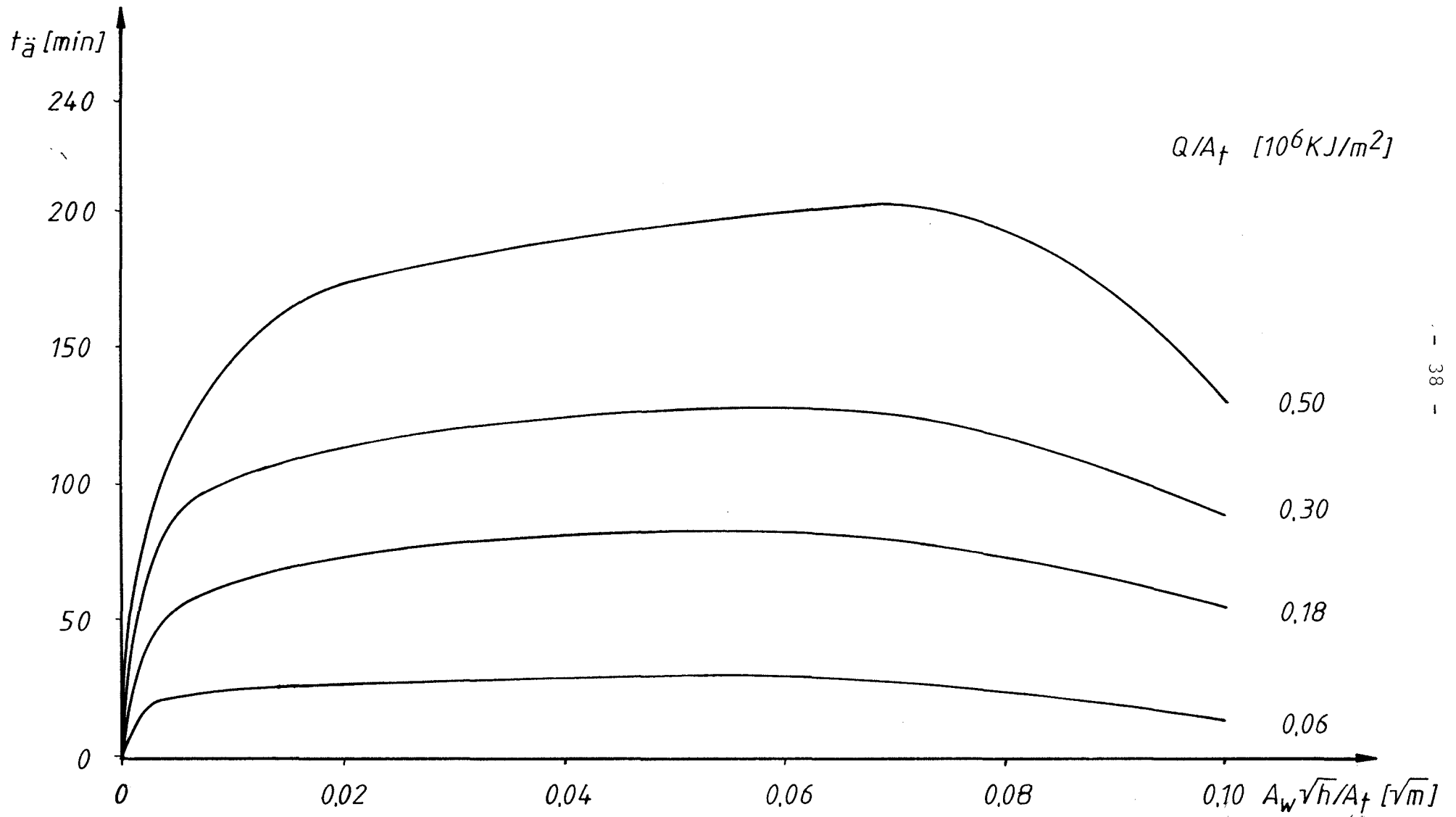


Bild 2.10 : Äquivalente Branddauer bei Kabelbränden in Kanälen mit natürlicher Ventilation
 Grundlage: 19 Programmläufe

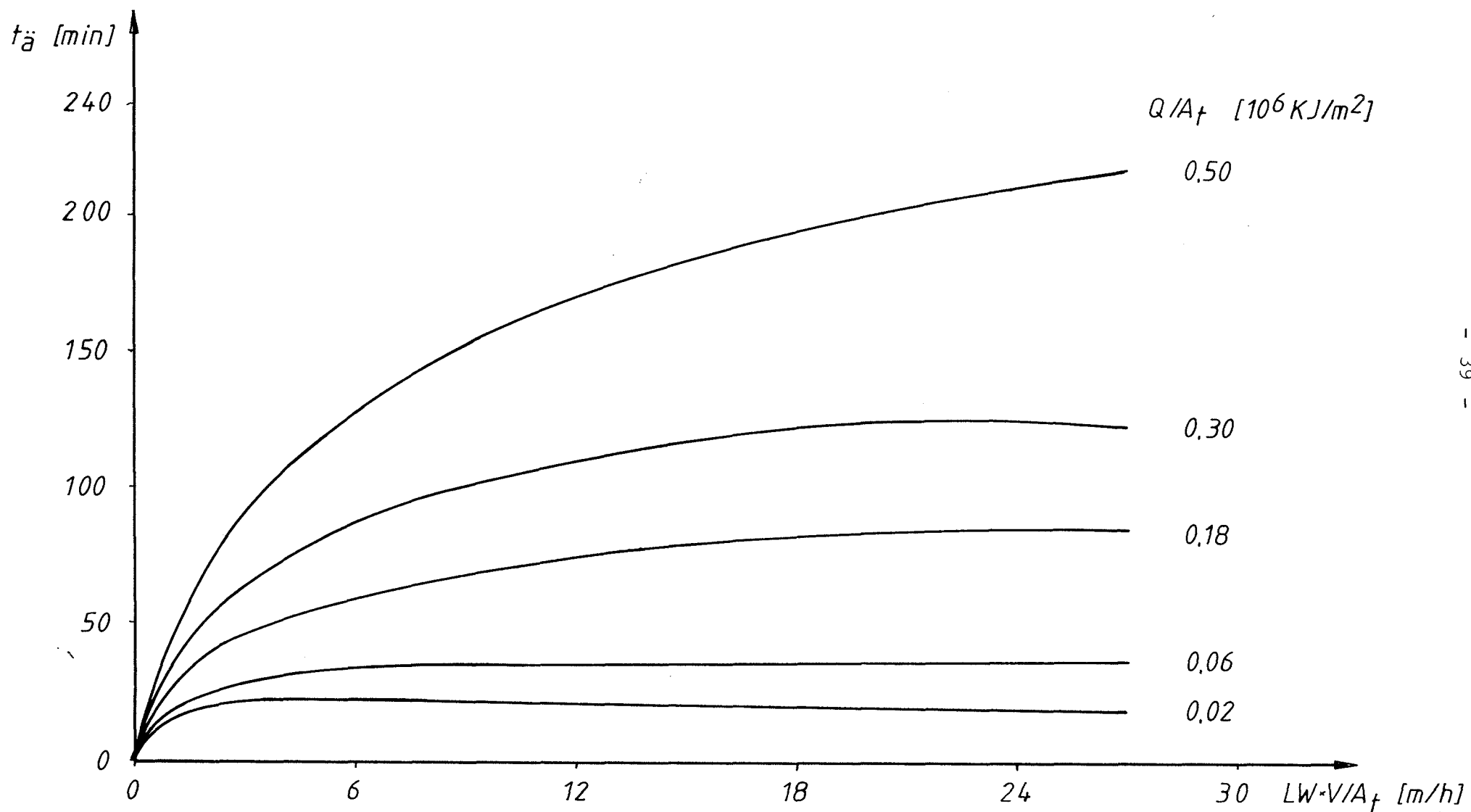


Bild 2.11 : Äquivalente Branddauer bei Kabelbränden in Kanälen mit erzwungener Ventilation
 Grundlage: 24 Programmläufe

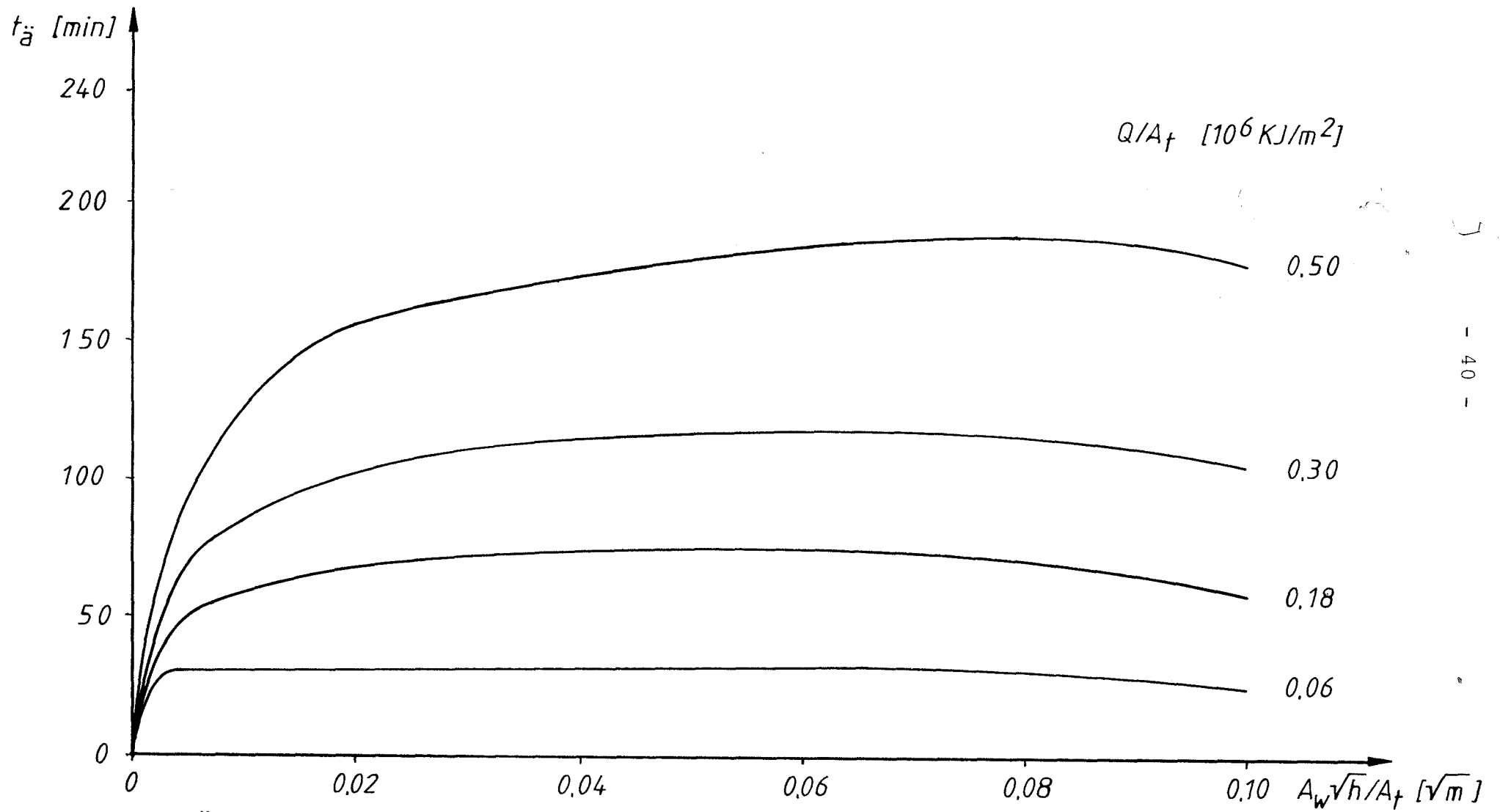


Bild 2.12 : Äquivalente Branddauer bei Kabelbränden in Schächten mit natürlicher Ventilation
 Grundlage : 19 Programmläufe

- 40 -

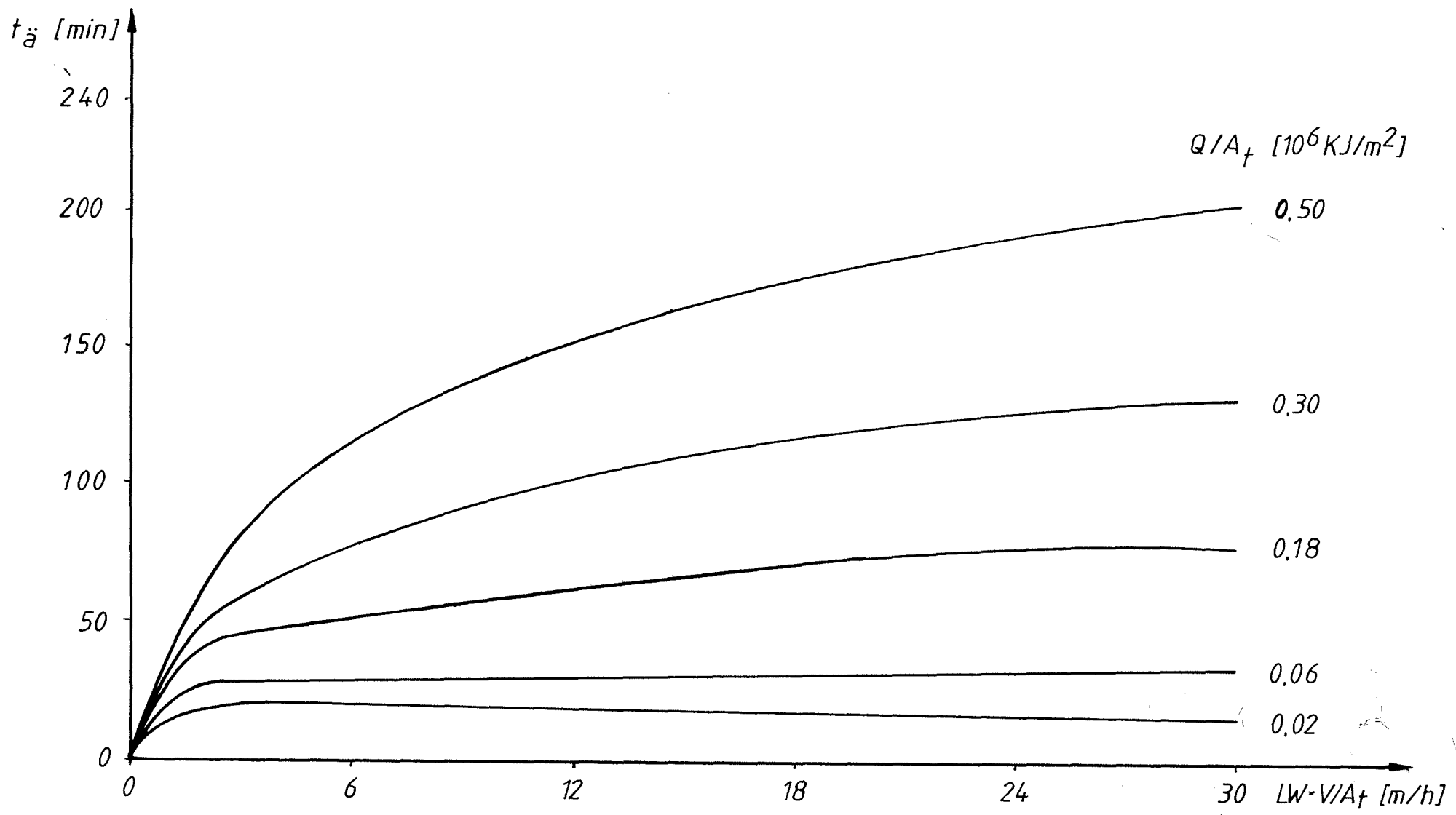


Bild 2.13 : Äquivalente Branddauer bei Kabelbränden in Schächten mit erzwungener Ventilation
 Grundlage : 21 Programmläufe

2.4 Überlegungen zum Sicherheitskonzept

2.4.1 Überblick

Der brandschutztechnische Nachweis wird primär für die passiven Brandschutzmaßnahmen durchgeführt, insbesondere für Bauteile zur brandschutztechnischen Trennung von Brandabschnitten, Brandbekämpfungsabschnitten oder sicherheitstechnisch bedeutsamen Redundanzen sowie für die Abschlüsse der darin befindlichen Öffnungen. Auslegungssituation ist der (bei regulären Bedingungen) in einem Raumbereich denkbare maximale, durch Löschmaßnahmen unbeeinflusste (und im allgemeinen vollentwickelte) Brand. In Abschnitt 2.2.4 wurde für ein solches Ereignis die mittlere jährliche Häufigkeit λ_b (1/a) ermittelt. Diese Häufigkeit λ_b berücksichtigt sowohl die raumspezifische Brandentstehungshäufigkeit als auch die Versagenswahrscheinlichkeit der vorgesehenen aktiven Brandschutzmaßnahmen (manuelle Löschmaßnahmen sowie Brandbekämpfung durch stationäre Löschanlagen).

Bei einigen Raumbereichen, in denen aufgrund der planmäßigen Ventilationsverhältnisse (z.B. keine oder nur geringe Belüftung) nur ein Schwelbrand - mit der angegebenen Häufigkeit λ_b - stattfinden kann, ist ggf. zusätzlich ein mit sehr viel geringerer Häufigkeit denkbarer Vollbrand zu untersuchen. Dieser kann z.B. auftreten, wenn im Brandfall unvorschriftsmäßig Türen offenstehen; in der Studie SR 144/1 /9/ ist aufgrund von Betriebserfahrungen angenommen, daß dies in 5 bis 10 von 100 Fällen möglich ist und praktisch immer zu einem Vollbrand im Raumbereich führt. Die reduzierte Häufigkeit dieses Ereignisses kann - sofern genauere Daten fehlen - mit

$$\lambda_b'' = \lambda_b / 15 \quad \left[1/a \right] \quad (2.11)$$

abgeschätzt werden.

Unter den Temperatureinwirkungen des für den Raumbereich zu erwartenden (natürlichen) Brandes und den gleichzeitig vorhandenen Einwirkungen des Normalbetriebs (z.B. Gebrauchslasten, Betriebsdruck), soll das betrachtete Bauteil seine Brandschutzfunktion mit ausreichender Zuverlässigkeit erfüllen. Diese ausreichende Zuverlässigkeit richtet sich einmal nach der Häufigkeit λ_b eines vollentwickelten Brandes und zum anderen nach der Art der maßgebenden Brandschutzfunktion. Wenn die Brandschutzfunktion beispielsweise nur durch ausreichende Standsicherheit eines Bauteils bei Brandeinwirkung gewährleistet werden kann, ist eine höhere Zuverlässigkeit zu fordern als in Fällen, bei denen die örtliche Temperaturerhöhung, auf der brandabgewandten Seite begrenzt werden soll.

Auf der Grundlage der in Abschnitt 2.3 durchgeführten Berechnungen kann die Brandeinwirkung für einen betrachteten brandschutztechnisch abgetrennten Raumbereich durch eine äquivalente Normbranddauer $t_{\ddot{a}}$ beschrieben werden. Sie ist zu vergleichen mit der Feuerwiderstandsdauer t_f der im Normbrandversuch nach DIN 4102 geprüften Bauteile. Bei baulichen Anlagen in Kernkraftwerken sind im Normbrandversuch ggf. zusätzliche Einwirkungen oder Prüfkriterien aufgrund sicherheitstechnischer Anforderungen zu beachten (vgl. Abschnitt 2.1).

Der Sicherheitsabstand zwischen Feuerwiderstandsdauer t_f und äquivalenter Branddauer $t_{\ddot{a}}$

$$Z = t_f - t_{\ddot{a}} \quad (2.12)$$

muß so groß sein, daß er die unvermeidlichen zufälligen Streuungen der Einflußgrößen in t_f und $t_{\ddot{a}}$ und Modellunsicherheiten in der vereinfachten Nachweisgleichung (2.12) zuverlässig abdeckt. Als Maß für die Zuverlässigkeit dient in Anlehnung an /10, 11/ das Verhältnis von Mittelwert m_z und resultierender Standardabweichung σ_z des Sicherheitsabstandes Z:

$$\beta_b = \frac{m_z}{\sigma_z} \quad (2.13)$$

Dieser Quotient heißt "Sicherheitsindex". Er ist mit der (bedingten) Versagenswahrscheinlichkeit p_{fb} des Bauteils im Brandfall über die Funktion Φ der Standard-Normalverteilung verknüpft

$$p_{fb} = \Phi(-\beta_b) \quad (2.14)$$

Der Einfluß der Streuungen der einzelnen Einflußgrößen X_i auf den Sicherheitsindex β_b kann mit Hilfe sogenannter "Wichtungsfaktoren" α_{X_i} beurteilt werden, deren Quadrate die relativen Beiträge der Einflußgrößen zur resultierenden Standardabweichung σ_Z gemäß Fehlerfortpflanzungsgesetz angeben (vgl. /10, 11/).

Für den brandschutztechnischen Nachweis ist der erforderliche Sicherheitsindex β_b in Abhängigkeit der Häufigkeit λ_b und des Versagenskriteriums (z.B. Standsicherheit oder maximale Temperaturerhöhung) vorzugeben. Aus β_b und den Wichtungsfaktoren α_{X_i} kann für jede Einflußgröße X_i ein "Bemessungswert" X_i^* als Fraktile einer bekannten oder sinnvoll angenommenen Wahrscheinlichkeitsverteilung definiert werden. Mit diesen Bemessungswerten können dann Bemessungswerte t_f^* und $t_{\ddot{a}}^*$ der abgeleiteten Größen bestimmt und in Gl. (2.12) eingesetzt werden. Ausreichende Zuverlässigkeit ist vorhanden, sofern

$$Z^* = t_f^* - t_{\ddot{a}}^* \geq 0 \quad (2.15)$$

Die Verhältnisse von Bemessungswerten t_f^* und $t_{\ddot{a}}^*$ und den entsprechenden Nennwerten (t_{fN} gemäß Klassifizierung, $t_{\ddot{a}N}$ gemäß Ermittlung im Einzelfall) können als Teilsicherheitsbeiwerte γ_{t_f} und $\gamma_{t_{\ddot{a}}}$ interpretiert werden:

$$\gamma_{t_f} = \frac{t_{fN}}{t_f} \quad (2.16)$$

$$\gamma_{t_{\ddot{a}}} = \frac{t_{\ddot{a}}^*}{t_{\ddot{a}N}}$$

Die Teilsicherheitsbeiwerte können schließlich als globaler Sicherheitsbeiwert (analog zu DIN 18230 /13, 11/) zusammengefaßt werden:

$$\gamma = \gamma_{t_f} \cdot \gamma_{t_{\ddot{a}}} \quad (2.17)$$

2.4.2 Parameterunsicherheiten bei den Brandwirkungen

Für die Streuungen des Temperatur-Zeit-Verlaufes im natürlichen Brand sind insbesondere

- die spezifische Abbrandgeschwindigkeit
- die Ventilationsverhältnisse im Brandraum
- die Höhe der Brandlast
- die Geometrie des Brandraumes

von Bedeutung. Diese Einflüsse wurden in Abschnitt 2.3 systematisch für Öl- und Kabelbrandlasten sowie für Räume mit natürlicher und mit Zwangsventilation studiert. Die Ergebnisse wurden mit denen einer früheren Studie /12/ verglichen. Aus den Parameterstudien lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

Die Abbrandgeschwindigkeit ist eine Funktion der Ventilationsverhältnisse und der Temperaturentwicklung im Brandraum; sie erreicht ein Maximum bei etwa stöchiometrischem Abbrand und weist sowohl bei Luftmangel (ventilationsgesteuerter Brand) als auch bei Luftüberschuß (brandlastgesteuerter Brand) kleinere

Werte auf. Bei Kabelbrandlasten hat nicht nur die Größe einer Zwangsventilation, sondern auch deren Richtung zu den Kabelpritschen einen großen Einfluß auf die Abbrandgeschwindigkeit. Der Einfluß der Streuungen von spezifischer Abbrandgeschwindigkeit und Ventilation auf die äquivalente Branddauer t_a ist bei geringer natürlicher Ventilation besonders groß. Die betreffenden Ergebnisse sind mit größeren Unsicherheiten behaftet, als dies in /12, 9/ abgeschätzt wurde.

Die in /12/ vorausgesetzte Proportionalität zwischen Brandlast und Branddauer konnte jetzt bestätigt werden. Ausgenommen bei sehr kleinen Brandlasten und geringer Ventilation (bei denen t_a vergleichsweise hoch ist) wächst t_a in guter Näherung linear mit der Brandlast. Damit pflanzen sich die Streuungen der Brandlast direkt in der äquivalenten Branddauer fort.

Die Geometrie des Brandraumes wurde durch unterschiedliche Wahl des Verhältnisses von Raumboherfläche A_t zu Grundfläche A variiert (Bild 2.14). Durch Bezug von Ventilation und Brandlast auf die Raumboherfläche A_t blieb dies ohne Auswirkung auf die äquivalente Branddauer t_a . Bei dieser Darstellungsweise brauchen also Unsicherheiten aufgrund des Geometrieinflusses nicht berücksichtigt zu werden.

Eine zusätzliche Modellunsicherheit wurde jedoch im Zusammenhang mit den Annahmen über die Brandherdgrößen festgestellt. Bei den Ölbränden wurde generell eine Ölläche in der Größe von 1/16 der Raumboherfläche A_t unterstellt; wenn die Brandherdgröße auf die halbe Fläche reduziert wird, ergeben sich bei sonst gleichen Bedingungen bis zu 25% höhere äquivalente Branddauern. Ein ähnlicher Effekt ist bei Kabelbrandlasten bezüglich der Anzahl der Kabelpritschen zu beobachten. Als repräsentativer Fall wurden hier 4 Pritschen unterstellt; bei 6 Pritschen (maximale Ausnutzung bei Kabelkanälen) wurde t_a bis zu 20% geringer, bei 3 Pritschen ca. 10% größer.

Ähnlich wie in /10, 11/ kann die resultierende Streuung der äquivalenten Branddauer $t_{\ddot{a}}$ infolge der diskutierten Unsicherheitsquellen mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes abgeschätzt werden das sich bekanntlich mit zunehmender Anzahl streuender Parameter, die näherungsweise normal verteilt sind, approximativ der strengen Lösung nähert :

$$\sigma_{t_{\ddot{a}}} \cong \sqrt{\left(\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial \bar{W}} \sigma_{\bar{W}}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial \bar{Q}} \sigma_{\bar{Q}}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial B} \sigma_B\right)^2} \quad (2.18)$$

- mit $\bar{W} \hat{=}$ bezogene Ventilation
 $= A_w \cdot h/A_t$ bei natürlicher Ventilation in $\left[\frac{\sqrt{m}}{m/h}\right]$
 $LW \cdot V/A_t$ bei Zwangsventilation in $\left[\frac{m/h}{m/h}\right]$
 $\bar{Q} \hat{=}$ bezogene Brandlast $= Q/A_t$ in $[10^6 \text{ kJ/m}^2]$
 $B \hat{=}$ Brandherdgröße
 $= F \cdot A_t$ bei Ölbrandlasten in $[m^2]$
 $n \cdot \text{Pritschen}$ bei Kabelbrandlasten $[-]$
 $\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial X_i} =$ partielle Ableitungen der äquivalenten Branddauer nach den Parametern X_i
 $\sigma_{X_i} =$ Standardabweichungen der Parameter X_i

Die Berechnung von $\sigma_{t_{\ddot{a}}}$ ist in Tabelle 2.6 zusammenfassend wiedergegeben. Hierbei wurde der Einfluß der Ventilation für 3 Brandlaststufen (Q/A_t) und der Einfluß der Brandlast für je 2 Ventilationsstufen ($A_w \sqrt{h}/A_t$ bzw. $LW \cdot V/A_t$) untersucht. Als Parameterstreuungen werden bei der Ventilation \bar{W} und Brandlast Q je 10 % und bei der Brandherdgröße 25 % angenommen.

Tabelle 2.6 a: Berechnung der Standardabweichung der äquivalenten Branddauer infolge von Parameterstreuungen bei Ölbrandlasten

Brandlast Öl	Ventilation	Parameteranteile						$\sigma_{t_{\ddot{a}}}$ $V_{t_{\ddot{a}}}$	
		$\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial \bar{w}}$	σ_w^-	$\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial \bar{Q}}$	σ_Q^-	$\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial B}$	σ_B		
$Q/A_t = 0,10$	Natur- $A_w \cdot \bar{h}/A_t = 0,01$	+ 500	0,001	535	0,01	2,3	4	11,93 $\hat{=} 27\%$	
		0,06	- 150	0,006	335	0,01	1,9	4	8,35 $\hat{=} 28\%$
	0,30	0,01	+1100	0,001	535	0,03	7,04	4	32,43 $\hat{=} 21\%$
		0,06	- 400	0,006	350	0,03	7,94	4	33,54 $\hat{=} 34,5\%$
	0,50	0,01	+1200	0,001	444	0,05	9,31	4	43,4 $\hat{=} 17\%$
		0,06	- 600	0,006	336	0,05	12,74	4	53,77 $\hat{=} 32\%$
Mittelwert: $V_m \approx 27\%$									
$Q/A_t = 0,10$	Zwangs- $LW \cdot V/A_t \approx 9$	+ 1,78	0,9	450	0,01	2,3	4	10,37 $\hat{=} 28\%$	
		≈ 40	- 0,25	4,0	575	0,01	1,9	4	9,58 $\hat{=} 22\%$
	0,30	9	+ 9,73	0,9	550	0,03	7,04	4	33,79 $\hat{=} 27\%$
		40	- 1,14	4,0	670	0,03	7,94	4	38,3 $\hat{=} 24\%$
	0,50	9	+16,32	0,9	528	0,05	9,31	4	47,95 $\hat{=} 20\%$
		40	- 1,88	4,0	628	0,05	12,74	4	59,86 $\hat{=} 20\%$
Mittelwert: $V_m \approx 24\%$									

Tabelle 2.6 b: Berechnung der Standardabweichung der äquivalenten Branddauer infolge von Parameterstreuungen bei Kabelbrandlasten (Kabelkanal)

Brandlast Kabel	Ventilation	Parameteranteile						$\sigma_{t_{\ddot{a}}}$ $V_{t_{\ddot{a}}}$	
		$\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial \bar{W}}$	$\sigma_{\bar{W}}$	$\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial \bar{Q}}$	$\sigma_{\bar{Q}}$	$\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial \bar{B}}$	$\sigma_{\bar{B}}$		
$Q/A_t = 0,06$	Natur- $A_w \cdot h/A_t = 0,02$	- 100	0,002	458	0,006	- 11	1	11,34 $\hat{=} 56\%$	
	0,07	- 700	0,007	383	0,006	- 10	1	11,37 $\hat{=} 34,5\%$	
	0,18	0,02	+ 200	0,002	500	0,018	- 11	1	14,22 $\hat{=} 19\%$
		0,07	- 733	0,007	392	0,018	- 10	1	13,27 $\hat{=} 17\%$
	0,50	0,02	- 950	0,002	300	0,050	-23,5	1	27,94 $\hat{=} 16\%$
		0,07	-2433	0,007	390	0,050	- 33	1	41,94 $\hat{=} 20,5\%$
Mittelwert: $V_m \approx 24\%$									
$Q/A_t = 0,06$	Zwangs- $L_w \cdot V/A_t = 3$	+2	0,3	142	0,006	- 2	1	5,09 $\hat{=} 17,5\%$	
	27	+0,14	2,7	408	0,006	- 7	1	7,43 $\hat{=} 21\%$	
	0,18	3	+3,7	0,3	142	0,018	- 6	1	6,62 $\hat{=} 14,4\%$
		27	+0,94	2,7	325	0,018	- 12	1	13,58 $\hat{=} 16\%$
	0,50	3	+10,8	0,3	120	0,050	- 18	1	19,25 $\hat{=} 22\%$
		27	+2,3	2,7	470	0,050	- 31	1	39,39 $\hat{=} 18\%$
Mittelwert: $V_m \approx 15\%$									

Die resultierenden Streuungen von t_a sind bei Zwangsventilation etwas geringer als bei Naturventilation; sie betragen im Mittel über alle untersuchten Fälle ca. 25 % - wie auch im Sicherheitskonzept zur DIN 18 230 (vgl. /11/) unterstellt wurde. Abweichungen nach oben bei sehr geringer Brandlast und Ventilation sind von der Bauteilbeanspruchung her ohne große praktische Bedeutung.

2.4.3 Parameterunsicherheiten bei den Feuerwiderstandsdauern

Die Feuerwiderstandsdauer t_f kann sowohl experimentell im Normbrandversuch als auch rechnerisch ermittelt werden. Ausschließlich experimentell bestimmte Feuerwiderstandsdauern liegen für Abschlüsse von Öffnungen in Umfassungsbauteilen (Türen, Brandschutzklappen, Kabelabschottungen) und für leichte Trennwände vor. Für diese Bauteile wurde in /9/ eine statistische Auswertung der verfügbaren Ergebnisse von Normbrandversuchen vorgenommen.

In der Mehrzahl der Fälle war die maximale Temperaturerhöhung auf der feuerabgekehrten Seite für das Bauteilversagen im Normbrand maßgebend. Bei einem Türtyp führte der Wattebauschversuch für den Raumabschluß zur Klassifizierung. Die mittlere Temperaturerhöhung war bei einigen leichten Trennwänden entscheidend für die Einstufung. Die Standsicherheit der nur durch ihr Eigengewicht belasteten Bauteile war in keinem Fall durch Brand gefährdet. Die statistischen Kennwerte der Feuerwiderstandsdauern aller betrachteten Bauteile der Klasse F 90 nach dem o.g. Temperaturkriterium sind in Tabelle 2.7 zusammengefaßt. Hieraus geht hervor, daß die mittleren Feuerwiderstandsdauern m_{t_f} bei 100 bis 115 min. liegen. Die Versuchsstreuungen (Variationskoeffizient V_{t_f}) betragen 11 - 24 %. Nach Erreichen der Nennfeuerwiderstandsdauer von 90 min haben die Bauteile eine Versagenswahrscheinlichkeit $p_N = 8 - 28$ %.

Tabelle 2.7: Statistische Kennwerte der Feuerwiderstandsdauer der betrachteten F 90 Bauteile nach dem Temperaturkriterium (180 K)

Bauteil	Bauart Variante	Kennwert			
		m_{t_f} (min)	σ_{t_f} (min)	V_{t_f}	p_N %
Feuerschutz- türen	-	115	28	0,24	19
Brandschutz- klappen	a)	96	10,6	0,11	28
	b)	103	16,5	0,16	8
Kabelschotts	Wandschotts	104	16	0,15	19
leichte Trennwände	-	106	13	0,12	11

a) in nichtbrennbaren Leitungen
b) in brennbaren Leitungen

Rechnerische Nachweise kommen insbesondere bei Bauteilen in Frage, deren Feuerwiderstandsdauer durch die Standsicherheit unter Brandeinwirkungen bestimmt wird. Die dabei auftretenden Unsicherheiten wurden in /9, 12/ untersucht. Für den ungünstigen Fall von Stahlbetonbauteilen mit - im Vergleich zu Stahlbauteilen - relativ stark streuenden Eigenschaften (Beton- und Stahlfestigkeit, Bewehrungslage) und Gebrauchslasten (Eigengewicht und Nutzlasten) wurde eine resultierende Streuung der Feuerwiderstandsdauer t_f von 10 - 20 % errechnet, wobei sich vorwiegend auf Biegung beanspruchte Bauteile günstiger verhalten als Druckglieder. Einschließlich eines Zuschlages für vorhandene Modellunsicherheiten ergeben sich als obere Grenze etwa die gleichen Streuungen wie bei den Feuerschutztüren gemäß Tabelle 2.7, nämlich ca. 25 %.

Es ist davon auszugehen, daß bei Stahlbauteilen die Streuungen etwa 10 %, bei Holzbauteilen bis zu 20 % betragen. Genauere Angaben sollen aus einer laufenden Forschungsarbeit der Autoren zum Bemessungsverfahren der DIN 18 230 gewonnen werden. Bis dahin sollte konservativ die Streuung von t_f wie bei Stahlbetonbauteilen angesetzt werden.

2.4.4 Herleitung von Sicherheitsbeiwerten für die Bemessung

Mit den zuvor bereitgestellten Daten können anhand der in /10, 11/ erläuterten probabilistischen Methoden Sicherheitsbeiwerte für die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen für Kernkraftwerke schlüssig hergeleitet werden. Hier werden lediglich die wesentlichen Schritte dokumentiert. Nach Abschnitt 2.2.4 läßt sich für jeden Raumbereich die Häufigkeit λ_b eines bei planmäßigen Ventilationsverhältnissen zu erwartenden maximalen Brandes und ggf. zusätzlich die Häufigkeit λ_b' eines bei unplanmäßiger Ventilation denkbaren Vollbrandes angeben. Für die praktische Anwendung ist eine zu weitgehende Differenzierung nach der Raumnutzung hinderlich; angesichts der relativ geringen nutzungsbedingten Unterschiede kann näherungsweise von einer mittleren Häufigkeit von Entstehungsbränden

$$\lambda_1 = \lambda_1 \cdot \frac{A_o}{A_{ges}} \approx 3 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1}{10} = 3 \cdot 10^{-3} \left[1/a \right]$$

$$\text{bzw. } \lambda_1' = \lambda_1/15 = 2 \cdot 10^{-4} \left[1/a \right]$$

für alle Raumbereiche ausgegangen werden (gültig für Anlagen mit 4 Redundanzen).

In Abhängigkeit von der Wirksamkeit der Brandbekämpfung (p_2 und p_3) ergeben sich dann die in Tabelle 2.8 zusammengestellten Häufigkeiten λ_b bzw. λ_b' von (vollentwickelten) Raumbränden.

Tabelle 2.8: Jährliche Häufigkeit von Raumbränden

Fall	Brandbekämpfung	Zeitpunkt nach Brandentstehung	p_2 *)	p_3 *)	λ_b (1/a)	λ_b' (1/a)
a	nur manuell	> 10 min	0,8	-	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
b	"	< 10 min	0,5	-	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
c	"	< 2 min	0,2	-	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
d	nur stationäre Löschanlage	> 10 min	1,0	0,4	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$
e	"	< 10 min	1,0	0,2	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
f	"	< 2 min	1,0	0,1	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
g	manuell oder Löschanlage	> 10 min	0,8	0,4	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$
h	"	< 10 min	0,5	0,2	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$

*) bei Zusammenwirken von manueller Brandbekämpfung und stationärer Löschanlage wird Unabhängigkeit (der Auslösung) vorausgesetzt

Gemäß /10, 11/ wird die zulässige Versagenswahrscheinlichkeit p_f der Bauteile infolge Brand entsprechend der bei anderen Lastfällen vorgegeben; hierbei werden zwei Arten der Gefährdung (d.h. Grenzzustände) unterschieden:

I Gefährdung der Standsicherheit: $p_f = 10^{-6}/a$

II Gefährdung der durch Kriterien definierten Brandschutzfunktion: $p_f = 10^{-3}/a$

Die Auslegung der Bauteile hat dann so zu erfolgen, daß unter der Bedingung eines Vollbrandes die (bedingte) Versagenswahrscheinlichkeit

$$P_{fb} = \frac{p_f}{\lambda_b} \quad (2.19a)$$

bzw. der zugehörige Sicherheitsindex

$$\beta_b = - \Phi^{-1} (p_{fb}) \quad (2.19b)$$

eingehalten wird; mit λ_b' gelten analog p_{fb}' und β_b' . Zahlenwerte sind in Tabelle 2.9 zusammengestellt.

Tabelle 2.9: Bedingte Versagenswahrscheinlichkeiten und Sicherheitsindizes für die brandschutztechnische Bemessung

Gefährdung	Brandbekämpfung	p_{fb}	β_b	p_{fb}'	β_b'											
I ($p_f=10^{-6}/a$)	a	$4,2 \cdot 10^{-4}$	3,34	$6,3 \cdot 10^{-3}$	2,50											
	b	$6,7 \cdot 10^{-4}$	3,21	$1,0 \cdot 10^{-2}$	2,34											
	c	$1,7 \cdot 10^{-3}$	2,94	$2,5 \cdot 10^{-2}$	1,96											
	d	$8,3 \cdot 10^{-4}$	3,15	$1,3 \cdot 10^{-2}$	2,22											
	e	$1,7 \cdot 10^{-3}$	2,94	$2,5 \cdot 10^{-2}$	1,96											
	f	$3,3 \cdot 10^{-3}$	2,72	$5,0 \cdot 10^{-2}$	1,65											
	g	$1,0 \cdot 10^{-3}$	3,09	$1,5 \cdot 10^{-2}$	2,17											
	h	$3,3 \cdot 10^{-3}$	2,72	$5,0 \cdot 10^{-2}$	1,65											
II ($p_f=10^{-3}/a$)	a	$4,2 \cdot 10^{-1}$	0,20	}	}											
	b	}	}													
	c					}	}									
	d							}	}							
	e									}	}					
	f											}	}			
	g													}	}	
	h															}
*) $p_{fb} > 0,5$ nicht berücksichtigt																

5

Mit den in Abschnitt 2.4.2 ausgewiesenen resultierenden Streuungen der äquivalenten Branddauer $t_{\ddot{a}}$ in Höhe von ca. 25% und den ebenfalls zu maximal 25 % ermittelten Streuungen der Feuerwiderstandsdauer t_f lassen sich theoretisch die Gesamtstreuungen des Sicherheitsabstandes σ_Z gemäß Abschnitt 2.4.1, Gl. (2.12) berechnen. Hierbei kann jedoch die mathematisch sinnvolle Annahme von Normalverteilungen bei hohen Zuverlässigkeitsanforderungen zu numerischen Schwierigkeiten (ggf. negative Feuerwiderstandsdauern) führen. Aus diesem Grunde werden - wie in /11/ empfohlen - logarithmische Normalverteilungen zugrundegelegt, die auch physikalisch sinnvoller sind (d.h. nur positive Werte liefern). In Gl. (2.12) sind dann lediglich anstelle von t_f und $t_{\ddot{a}}$ die entsprechenden natürlichen Logarithmen einzusetzen:

$$Z = \ln t_f - \ln t_{\ddot{a}} \quad (2.20)$$

Der Sicherheitsabstand Z ist in diesem Fall ebenfalls logarithmisch normalverteilt mit den Kennwerten

$$m_Z = \ln (\check{t}_f / \check{t}_{\ddot{a}}) \quad (2.21)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\ln (V_{t_f}^2 + 1) + \ln (V_{t_{\ddot{a}}}^2 + 1)} \quad (2.22)$$

Dabei sind

$\check{t}_f, \check{t}_{\ddot{a}}$ = Zentralwerte (50%-Fraktilen)

$V_{t_f}, V_{t_{\ddot{a}}}$ = Variationskoeffizienten (= 25%) .

Bestimmt man nach dem Vorschlag in DIN 18 230 /11, 13/ den Nennwert der Brandlast Q für die Raumbereiche im Einzelfall so, daß er in höchstens 10 % der Nutzungsdauer überschritten wird, und definiert man weiterhin die Nennfeuerwiderstandsdauer (Feuerwiderstandsklasse) so, daß sie bei mindestens 90 % der Bauteile

überschritten wird, so errechnet sich ein erforderlicher Nennsicherheitsbeiwert γ für die brandschutztechnische Bemessung wegen der Gleichheit der beiden Variationskoeffizienten (und damit $\alpha_{t_f} = -\alpha_{t_{\ddot{a}}} = 0,7$) sehr einfach wie folgt (vgl./11/):

$$\gamma = \exp \left[2 \cdot (0,7 \cdot \beta_b - 1,282) \cdot 0,25 \right] \quad (2.23)$$

Die Auswertung der Gl. (2.23) erfolgt in Tabelle 2.10 für die in Tabelle 2.9 unterschiedenen Fälle.

Tabelle 2.10: Sicherheitsbeiwerte γ für die brandschutztechnische Bemessung

Brandbekämpfung	Gefährdungsart I Ventilation		Gefährdungsart II Ventilation	
	planmäßig	unplanmäßig	planmäßig	unplanmäßig
a	1,71	1,27	0,54	0,53
b	1,63	1,20		
c	1,48	1,05		
d	1,60	1,15	0,53	
e	1,48	1,05		
f	1,37	0,94		
g	1,56	1,13		
h	1,37	0,94		

Die Unterschiede in den Sicherheitsbeiwerten γ der Tabelle 2.10 für verschiedene Brandbekämpfungsarten sind teilweise sehr gering. Es liegt daher nahe, zur Erleichterung der praktischen Anwendung die Brandbekämpfungsarten wie folgt zusammenzufassen (Tabelle 2.11).

Tabelle 2.11: Neue Einteilung der Brandbekämpfungsarten

Fall		Brandbekämpfung	Zeitpunkt nach Brandentstehung
neu	alt		
A	a	nur manuell	> 10 min
B	b	nur manuell <u>oder</u>	< 10 min
	d	nur stationäre Löschanlage <u>oder</u>	> 10 min
	g	manuell und Löschanlage	> 10 min
C	c	nur manuell (durch Verursacher) <u>oder</u>	< 2 min
	e	nur stationäre Löschanlage	< 10 min
D	f	nur stationäre Löschanlage (Sprinkler) <u>oder</u>	< 2 min
	h	manuell und Löschanlage	< 10 min

Hieraus ergeben sich für die Gefährdungsklasse I (Standicherheit) die in Tabelle 2.12 angegeben gerundeten Sicherheitsbeiwerte γ . Für die Gefährdungsklasse II (Raumabschluß oder Temperaturerhöhung auf der brandabgekehrten Seite) gilt in allen Fällen

$$\gamma^{II} = 0,5 \quad (2.23)$$

Tabelle 2.12: Sicherheitsbeiwerte γ^I für die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen der Gefährdungsklasse I

Brandbekämpfung Fall	Ventilation	
	planmäßig	unplanmäßig
A	1,7	1,3
B	1,6	1,2
C	1,5	1,1
D	1,4	0,9

3. PRAKTISCHER BEMESSUNGSVORSCHLAG

3.1 Grundkonzept und Voraussetzungen

Das Grundkonzept der Bemessung entspricht dem der DIN 18 230 /13/:

- 1) Als Vergleichsgröße für die Bauteilbeanspruchung bei dem in einem Raumbereich zu erwartenden natürlichen Brand wird eine äquivalente Normbranddauer $t_{\ddot{a}}$ - mit ihrem Nennwert $t_{\ddot{a}N}$ - berechnet.
- 2) Die äquivalente Branddauer wird mit einem Sicherheitsbeiwert γ beaufschlagt, der die Häufigkeit des zugrundegelegten Brandes, die Wirksamkeit der Brandbekämpfung sowie die Art der Gefährdung des zu bemessenden Bauteiles durch Brand berücksichtigt.
- 3) Auf diese Weise wird eine erforderliche Nennfeuerwiderstandsdauer t_{fN} ermittelt, die kleiner als die Feuerwiderstandsklasse (F, T, K, L) der Bauteile sein soll.

Voraussetzung für die Anwendung dieses Konzeptes ist, daß

- die Brandlast raumweise im Einzelfall ermittelt wird, wobei sichergestellt sein muß, daß der Nennwert Q höchstens in 10% der Nutzungsdauer vorübergehend überschritten wird
- die Raumgeometrie (Oberfläche A_t) sowie Art und Größe der planmäßigen und ggf. unplanmäßigen Ventilation (Öffnungsfläche A_w , Öffnungshöhe h , Luftwechselrate LW) bekannt sind.

Abweichend von DIN 18 230 /13/ wird bei der Bestimmung der äquivalenten Branddauer $t_{\ddot{a}N}$ auf die Verwendung von konstanten Bewertungsfaktoren - m für das Abbrandverhalten, w für die Ventilation und c für die Wärmeaufnahme durch Umfassungsbauteile -

verzichtet. Stattdessen wird auf die Ergebnisse der umfangreichen Wärmebilanzrechnungen in Abschnitt 2.3 zurückgegriffen, die für die in Kernkraftwerken wesentlichen Öl- und Kabelbrandlasten sowie für natürliche und Zwangsventilation in Diagrammen zusammengefaßt werden (Abschnitt 3.2). Andere Brandlastarten sind, sofern sie von der Menge überhaupt ins Gewicht fallen, sinnvoll zuzuordnen.

Das Sicherheitskonzept gemäß Abschnitt 2.4 sieht unterschiedliche Sicherheitsbeiwerte γ in Abhängigkeit von der Häufigkeit des Brandes (λ_b oder λ_b'), der Art der Brandbekämpfung (Fälle a, b, c) und der Gefährdungsart der Bauteile (Fälle I und II) vor. Hierfür können unmittelbar die in Tabelle 2.10 angegebenen Zahlenwerte, ggf. nach Rundung, herangezogen werden. Auf die Modifikation eines mittleren Sicherheitsbeiwertes γ durch Zusatzbeiwerte γ_{nb} gemäß /11, 13/ wird wegen der damit verbundenen Näherungen verzichtet.

3.2 Bemessungshilfen

Auf der Basis von Abschnitt 2.3 wurden eine Reihe von Bemessungsdiagrammen zur Ermittlung von $t_{\text{äN}}$ für Öl- und Kabelbrände erstellt.

Eingangswerte in die Diagramme sind bezogene Werte der Brandlast (Q/A_t in 10^6 KJ/m^2) und der Ventilation ($A_w \cdot \sqrt{h}/A_t$ in $\sqrt{\text{m}}$ bei natürlicher Ventilation bzw. $LW \cdot V/A_t$ in m/h bei Zwangsventilation). Aus Gründen einer konsistenteren Darstellung wurde der Ventilationsparameter als Abszisse und der Brandlastparameter als Scharparameter gewählt. Nach bisherigen Erkenntnisse ist der gesamte, in Kernkraftwerken vorkommende Wertebereich abgedeckt. Zwischenwerte der bezogenen Brandlast dürfen linear interpoliert werden.

Die nachfolgenden Bemessungsdiagramme gelten für folgende Fälle:

Bild 3.1 Ölbrände bei (überwiegend) natürlicher Ventilation durch Öffnungen der Gesamtfläche A_w und Höhe h

Bild 3.2 Ölbrände bei Zwangsventilation mit der Luftwechselrate LW

Bild 3.3 Kabelbrände bei natürlicher Ventilation (analog Bild 3.1)

Bild 3.4 Kabelbrände bei Zwangsventilation (analog Bild 3.2).

Die äquivalenten Branddauern bei den Kabelbränden in Bild 3.3 und 3.4 gelten für Kabelbrände, bei denen ungünstigste Beanspruchungen entstehen, wenn längs der Kabelpritschen ventiliert wird. Kabelschächte mit üblichen Ventilationsverhältnissen erwiesen sich als vergleichbar und sind damit durch die Bilder 3.3 und 3.4 mit abgedeckt.

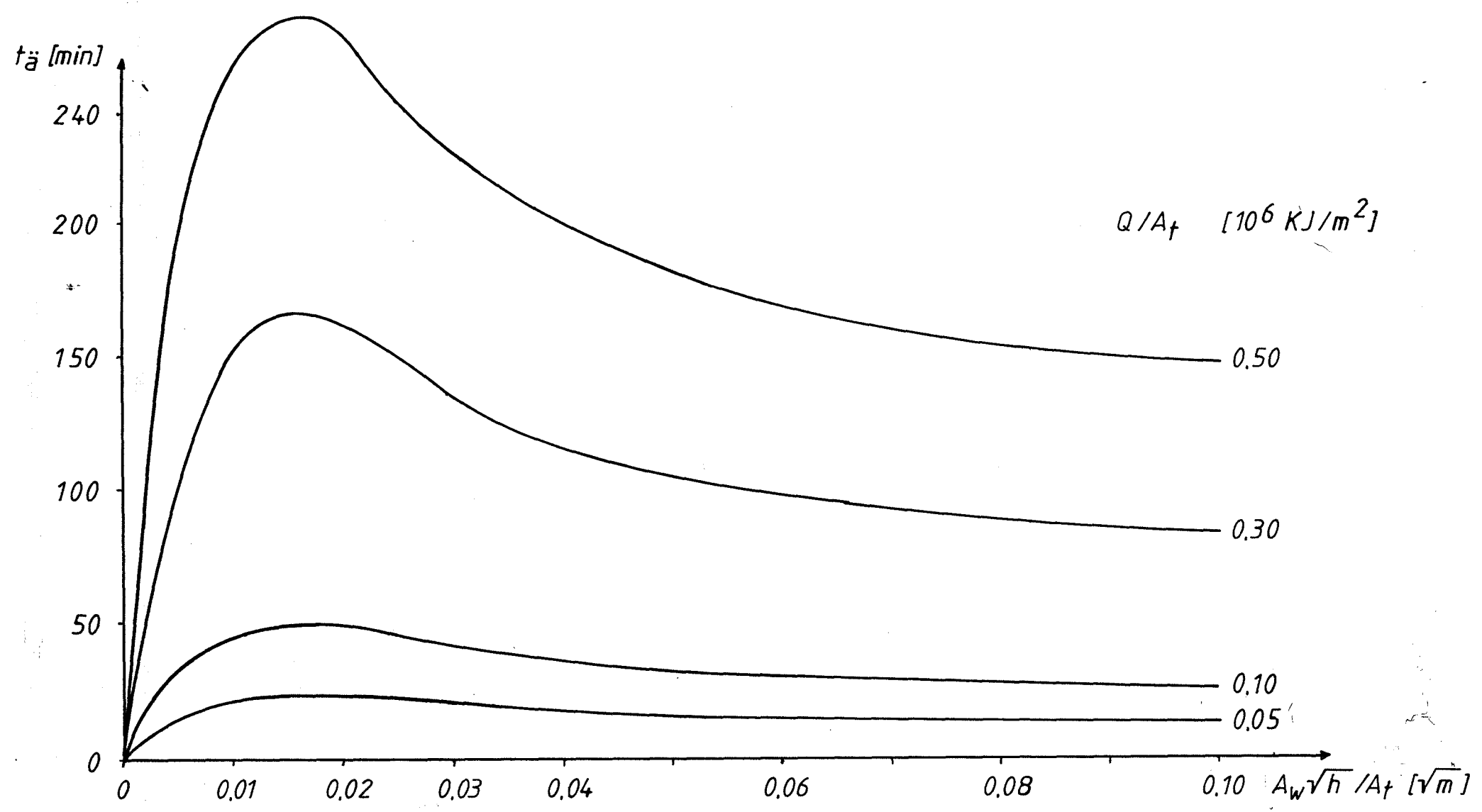


Bild 3.1: Äquivalente Branddauer bei Ölbränden mit natürlicher Ventilation

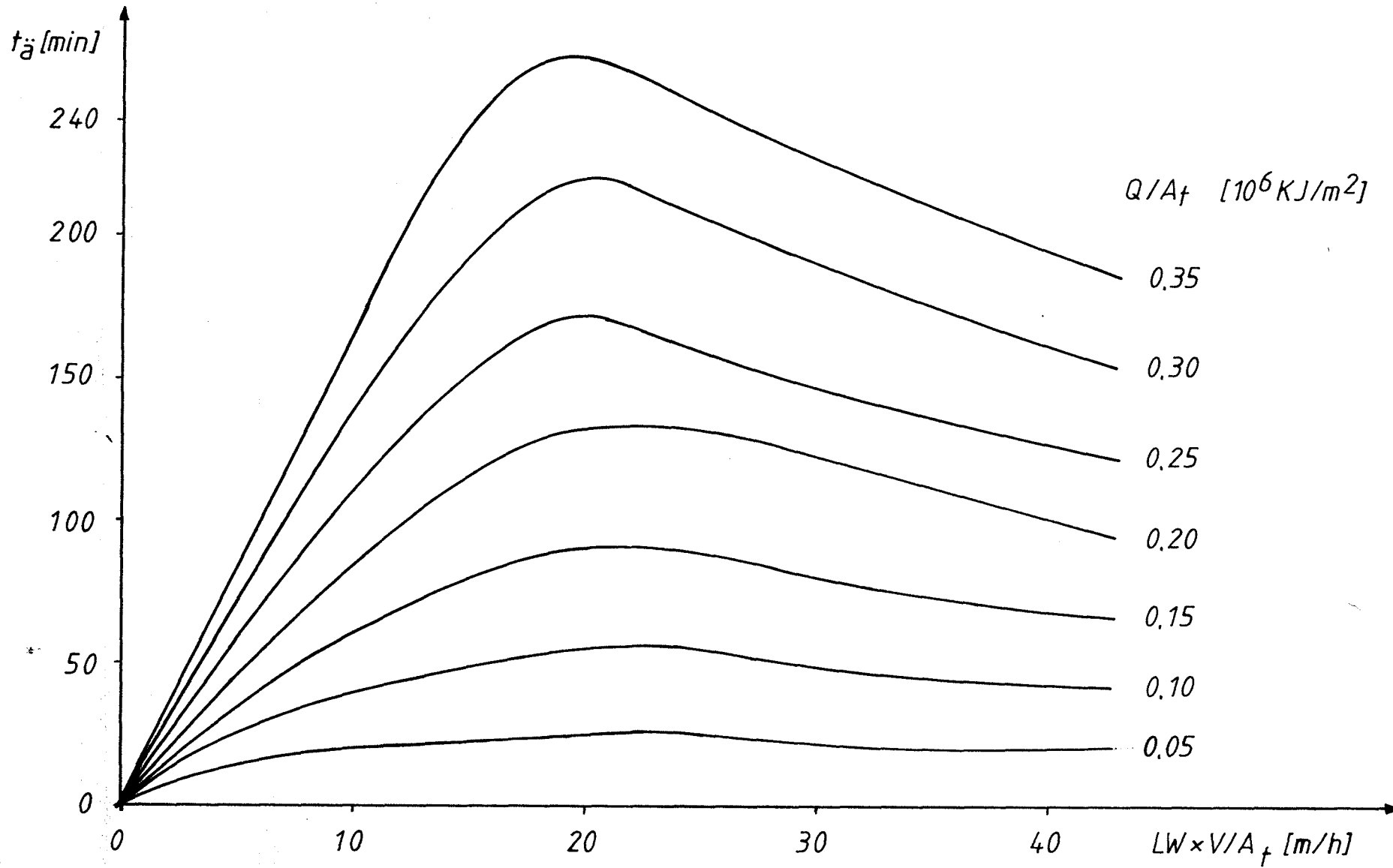


Bild 3.2: Äquivalente Branddauer bei Ölbränden mit erzwungener Ventilation

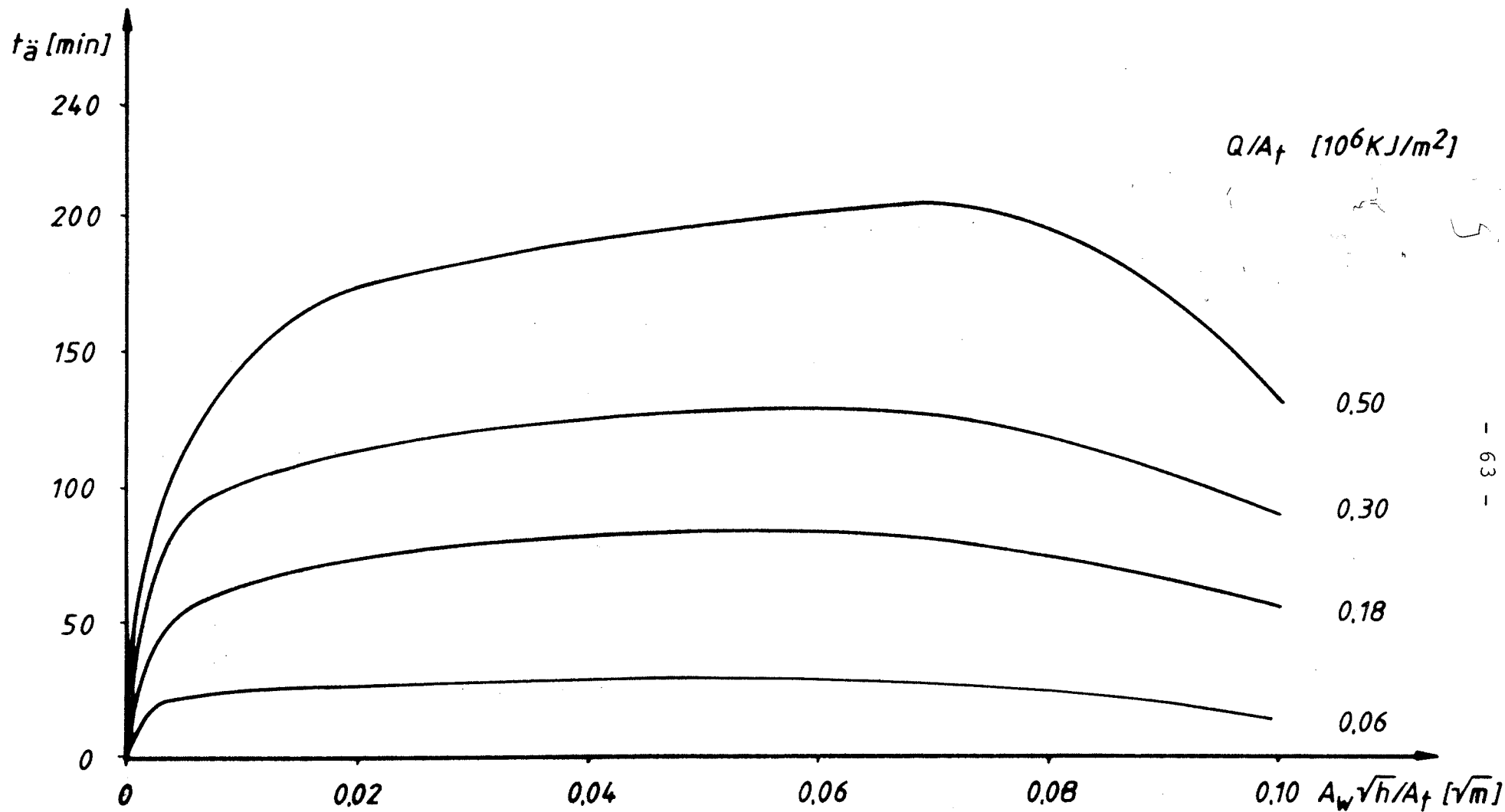


Bild 3.3: Äquivalente Branddauer bei Kabelbränden mit natürlicher Ventilation

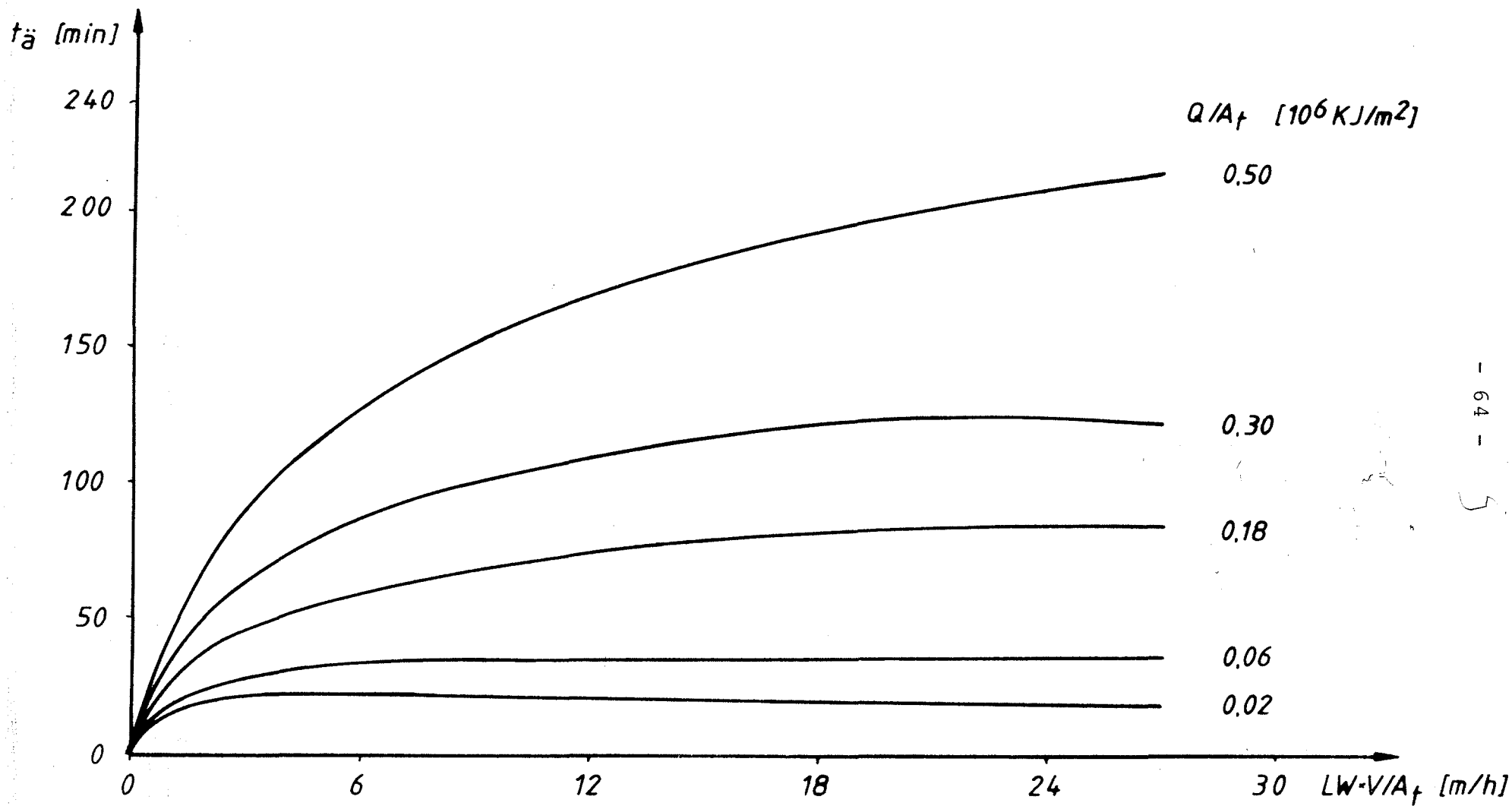


Bild 3.4 : Äquivalente Branddauer bei Kabelbränden mit erzwungener Ventilation

3.3 Anwendungsbeispiele

Die Durchführung der brandschutztechnischen Bemessung soll am Beispiel der in der Studie SR 144/1 /3, 9/ behandelten Referenzanlage (DWR-Anlage neuerer Bauart mit 1300 MW) erläutert werden. Hierbei werden nur brandschutztechnisch und sicherheitstechnisch relevante Raumbereiche betrachtet. Eine Zusammenstellung der Eingangsdaten für diese Raumbereiche findet sich in Tabelle 3.1.

Die Brandlast-Ventilations-Kombinationen sind - soweit im Wertebereich der Diagramme enthalten - in den Bemessungshilfen unter Angabe der Raumbezeichnung eingetragen (Bild 3.5 und 3.6); bei unplanmäßiger Ventilation ist die Raumbezeichnung eingeklammert. Die Räume B, C und H lassen sich wegen ungewöhnlicher Ventilation oder Brandlast nicht darstellen. Hier sind gesonderte Überlegungen erforderlich.

Die abgelesenen äquivalenten Branddauern der Raumbereiche sind in Tabelle 3.2 angegeben. Dort sind auch die zugehörigen Sicherheitsbeiwerte γ sowie die daraus resultierenden erforderlichen Feuerwiderstandsdauern t_{fN} eingetragen.

Bei den von der Brandlast her sehr ungünstigen Raumbereichen A, D, G und I wird jeweils der Fall der unplanmäßigen Ventilation durch offenstehende Türen bzw. Betrieb der RWA bemessungsentscheidend. Die Anforderungen an die Feuerwiderstandsklasse der tragenden Bauteile liegen teilweise deutlich über F 90; angesichts der gegebenen massigen Stahlbetonbauteile bereitet dies i.d.R. keine Probleme. Die kritischeren Abschlüsse von Öffnungen (Türen, Schotts, Brandschutzklappen) erfüllen mit T90/F90/K90 durchweg die niedrigeren Anforderungen ($\gamma^{II}=0,5$) der Gefährdungsklasse II; einzig bei dem Ölbehälterraum erscheinen zusätzliche Überlegungen, z.B. automatische Auslösung der Löschanlage (vgl. Fall D in Tabelle 3.2) oder Verringerung der zulässigen Leckagemenge (1000 kg Öl) aufgezeigt.

Tabelle 3.1: Zusammenstellung der bei SR 144 untersuchten Brandräume

Brandraum	Seite in Fachband 3	Grundfl. A [m ²]	Volumen V [m ³]	Oberfläche A _t [m ²]	Brandlast			natürliche Ventilation		Zwangsventilation		in Bild
					Art	Menge [kg]	Q/A _t [$\cdot 10^6$ kJ/m ²]	A _w [m ²]	A _w \sqrt{h}/A_t [m ^{1/2}]	\dot{m}_z [kg/s]	L _w · V/A _t [m/h]	
A	40	18,8	55	90	Öl	1000	0,419	1,78 ^{*)}	0,028	0,009 ^{***)}	0,306	3.5 a/b
B	59	1260	73700	10200	Öl	1000	0,0037	0,36 (Decke)				-
B	61							8,0 (Decke)				-
C	78	147	560	811	PVC	1200	0,028	48,4 (+Decke)	0,189			-
D	94	2,7	39,5	104,1	PVC (vert.)	1800	0,398	2,0 ^{*)}	0,027	0,007 ^{***)}	0,190	3.6 a/b
E2	130	48,0	144,0	297,0	PVC (hor.)	960	0,0744	4,0 ^{*)}	0,019			3.6 a
E2										0,072	0,725	3.6 b
F a)	144	36,5	99,0	139,1	PVC u. a.	650	0,141			0,17	3,653	3.6 b
F b)								3,4 ^{*)}	0,0346			3.6 a
G a)	158	341,0	716,1	887,8	PVC (hor.)	9000	0,233			0,5	1,683	3.6 b
G b)								12,4 ^{*)}	0,024			3.6 a
G c)										2,64 ^{**)}	8,888	3.6 b
H	173	60,0	191,4	230,2	Öl	25500	4,754	4,0 ^{*)}	0,0246			-
H										1,2	15,58	-
I	188	109,0	239,0	562,0	PVC (hor.)	9900	0,331			1,5	7,98	3.6 b
I								1,78 ^{*)}	0,00448			3.6 a

*) unplarmäßige Ventilationsverhältnisse

***) 0,5 facher Luftwechsel (Ritzenfaktor)

***) bei Betrieb der mech. Entrauchungsanlage

Tabelle 3.2: Äquivalente Branddauern und erforderliche Feuerwiderstandsdauerh von Bauteilen der Gefährungsklasse I in ausgewählten Raumbereichen

Raumbereich	$t_{a,N}$ (min)	gemäß Bild	Brandbek. Fall	Ventilation	γ	$t_{f,N}$ (min)	Bemerkung
A Ölbehälterr.	10	3.5 b	B	planmäßig	1,6	16	Leckage von 1000 kg Öl als Brandlast mit Ölbehälter als Wärmesenke
	197	3.5 a		unplanmäßig	1,2	236	
	148 ^{*)}			"	1,2	177	
D Kabelschacht	10	3.6 b	A	planmäßig	1,7	17	Tür offen "
	146	3.6 a		unplanmäßig	1,3	190	
	146	3.6 a	D ^{**)}	"	0,9	131	
E2 Kabelkanal	18	3.6 b	A	planmäßig	1,7	31	Zwangsluft
	33	3.6 a		unplanmäßig	1,3	43	Tür offen
	33	3.6 a	D ^{**)}		0,9	30	"
F Feststoffpresse	45	3.6 b	B	planmäßig	1,6	72	Zwangsluft
	66	3.6 a		unplanmäßig	1,2	79	Tür offen
G Unterwarten- raum	38	3.6 b	B	planmäßig	1,6	61	Zwangsluft
	91	3.6 a	B	unplanmäßig	1,2	109	Tür offen
	82	3.6 b	"	"	1,2	98	RWA
	91	3.6 a	D ^{**)}	"	0,9	82	Tür offen
I Kabelkanal	100	3.6 b	B	planmäßig	1,6	160	Zwangsluft
	92	3.6 a	B	unplanmäßig	1,2	110	Tür offen
	92	3.6 a	D ^{**)}	"	0,9	83	"

*) pauschale Abminderung auf 75 % zur Berücksichtigung der Absorberwirkung des Ölbehälters; hierbei muß sichergestellt sein, daß der Behälterinhalt nicht über die Siedetemperatur hinaus aufgeheizt wird

***) für den Fall einer unverzüglich auszulösenden stationären Löschanlage

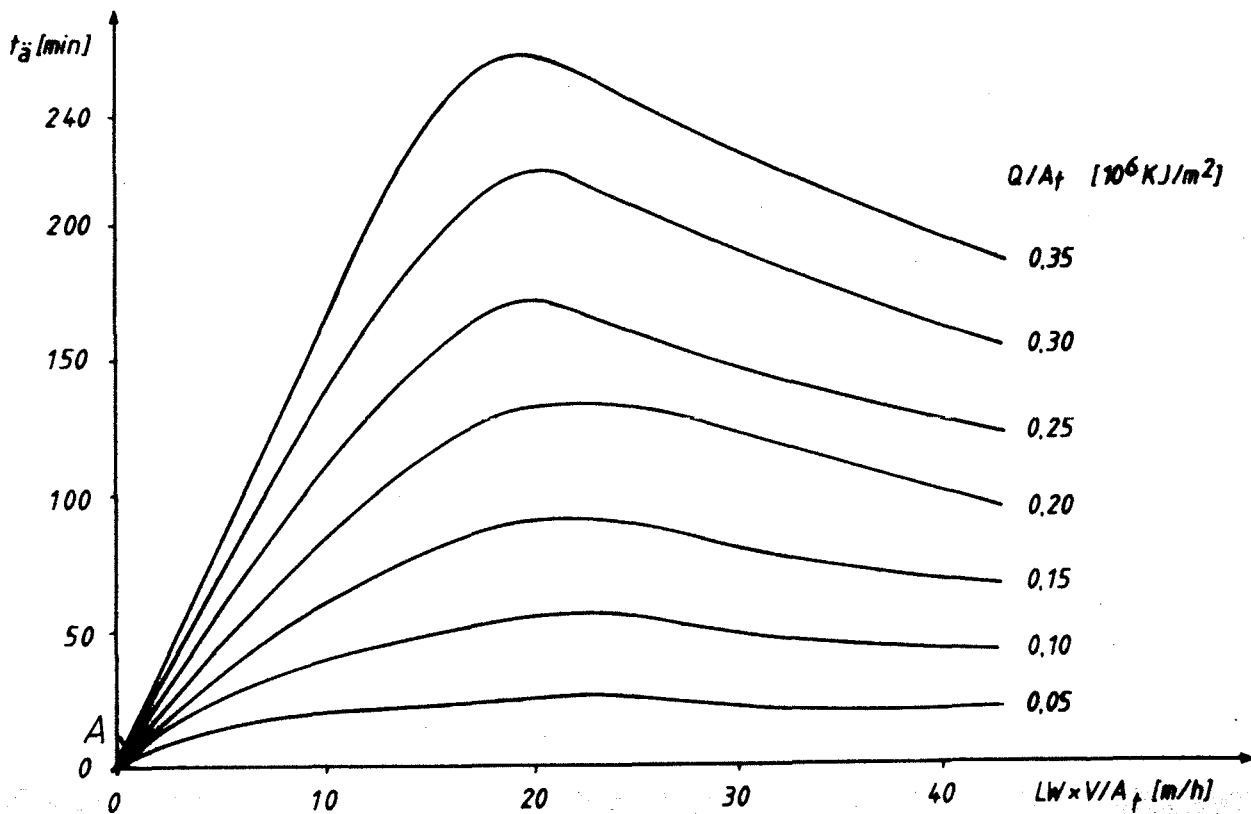
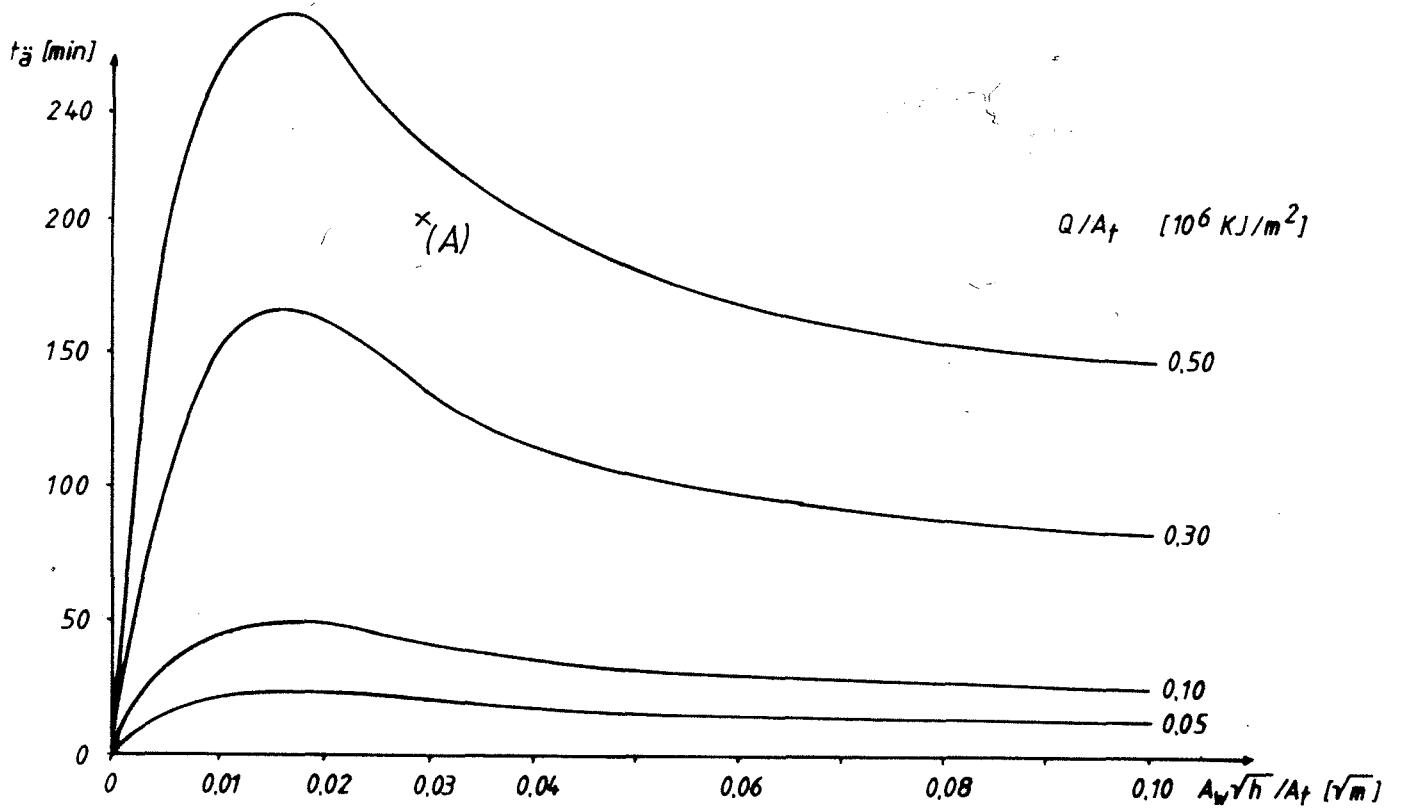


Bild 3.5 : Anwendungsbeispiele für Ölbrände

aus Studie SR 144 / 1

oben : natürliche Ventilation

unten : erzwungene Ventilation

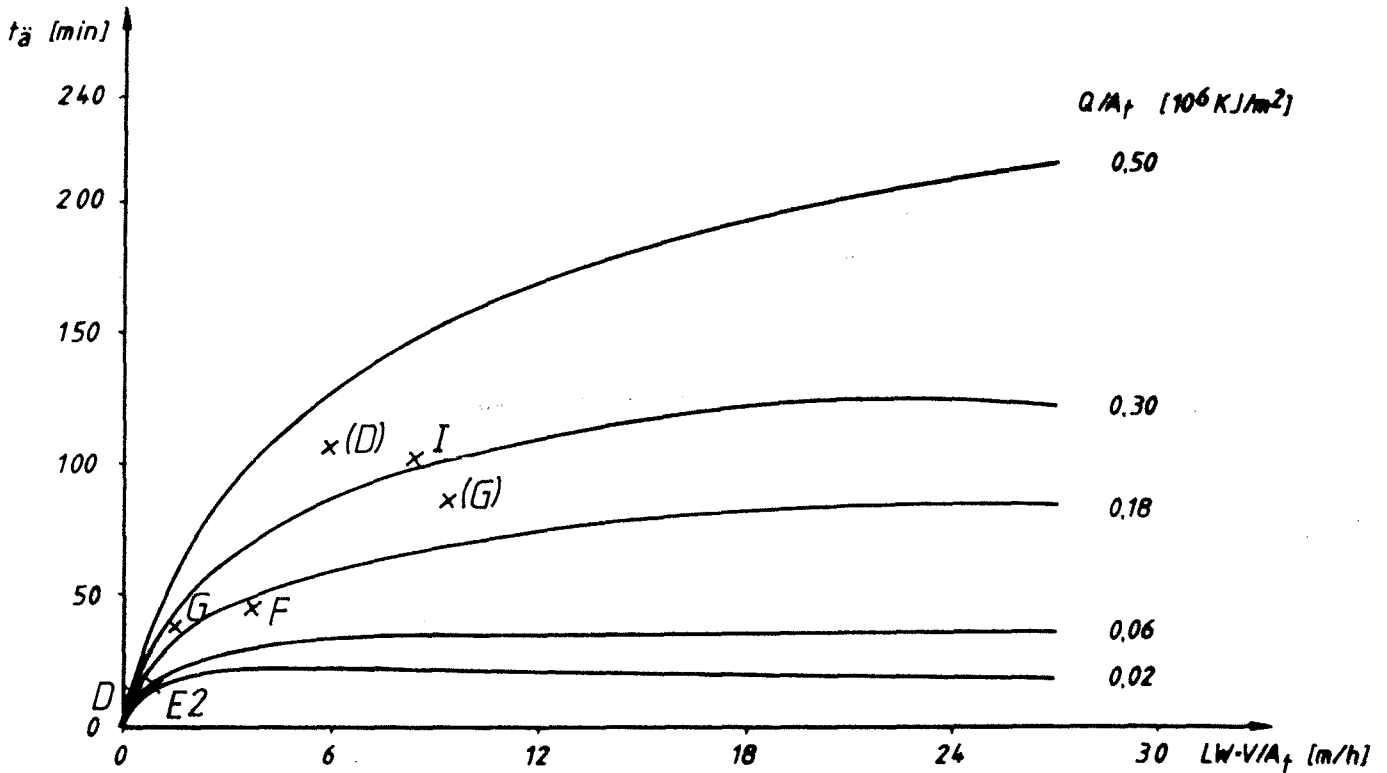
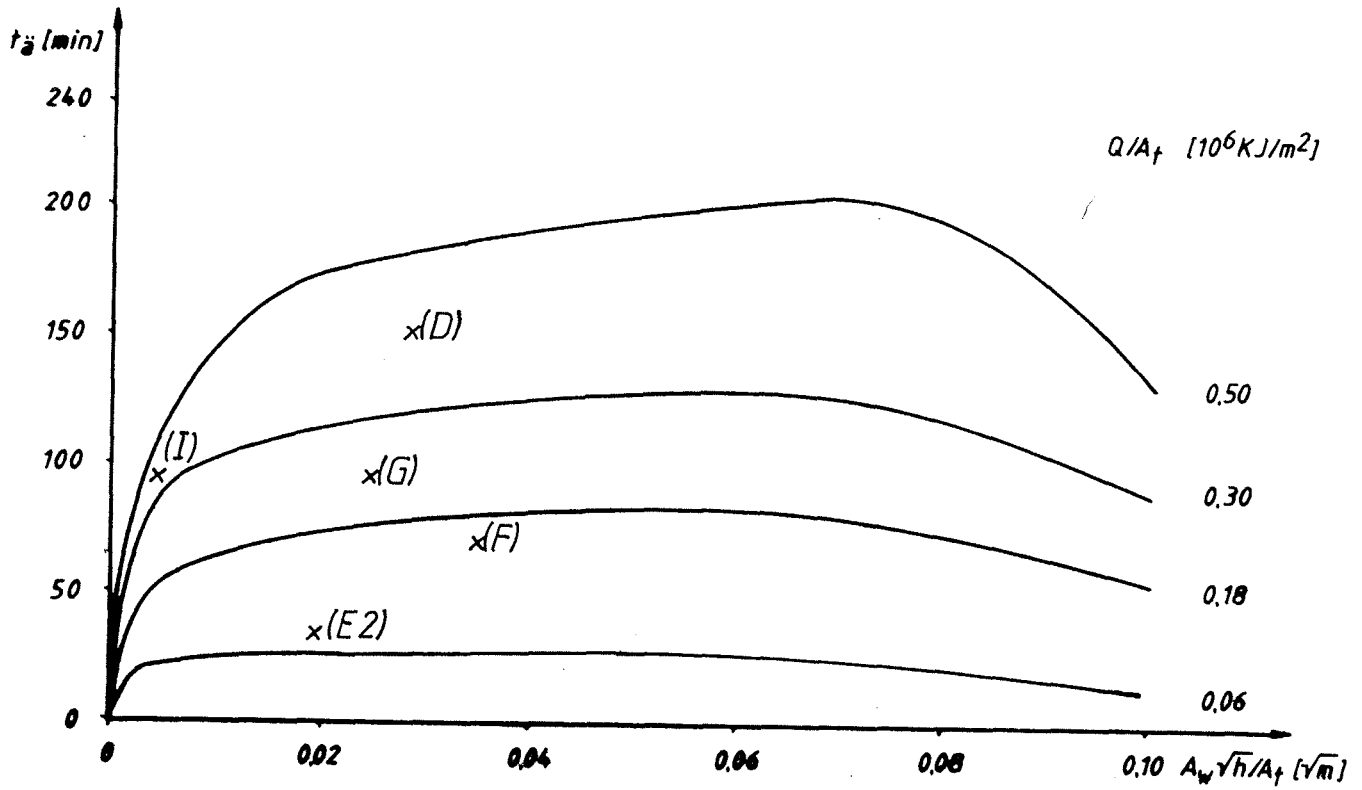


Bild 3.6 : Anwendungsbeispiele für Kabelbrände aus Studie SR 144 / 1

oben : natürliche Ventilation

unten : erzwungene Ventilation

4. Beurteilung der Brandrauchbildung

4.1 Allgemeines

Der durch einen Brand in einem KKW entstehende Rauch breitet sich im betroffenen Gebäude aus, wenn keine besonderen Schutzmaßnahmen getroffen werden. Brandrauch stellt die größte Gefahr für Personen dar. Nahezu alle Todesfälle bei konventionellen Gebäudebränden sind durch die Einwirkung des Brandrauches hervorgerufen worden.

Brandrauch wirkt in mehrfacher Weise auf den Menschen ein. Neben der direkten Gesundheitsgefahr durch toxische Gase, z.B. Kohlenmonoxid oder die Atemwege reizende Säurenanteile, ergeben sich durch die Sichtbehinderung so große psychologische und physiologische Auswirkungen, daß z.B. Rettungswege nicht mehr benutzt werden bzw. benutzt werden können. Diese Sichtbehinderung stellt auch eine Gefahr für die Personen dar, die mit Atemschutzgeräten ausgerüstet sind.

Bei der Beurteilung der direkten Gesundheitsgefahr ist zu berücksichtigen, daß gewisse toxische Gase im Brandrauch bei kurzen Einwirkungszeiten noch keine Gesundheitsschäden verursachen. Durch die eingeschränkten Sichtverhältnisse wird jedoch die Zeit für das Verlassen der mit den toxischen Gasen angefüllten Räume vergrößert bzw. die Zeit bis zum Auffinden von an der Flucht gehinderten Personen durch Retter verlängert, wodurch die Einwirkungsdauer so groß werden kann, daß dadurch Gesundheitsschäden auftreten. Die Sichtbehinderung innerhalb von Rettungswegen stellt daher sowohl für die Personen, die im Brandfall das Gebäude verlassen müssen, als auch für die Rettungsmannschaften ein spezielles Risiko dar.

Im folgenden wird zunächst über die Sichtbehinderung durch Brandrauch berichtet. Daran anschließend sollen gesundheitliche Aspekte behandelt werden. Anhand einiger Beispielrechnungen wird dann gezeigt, welche zeitlichen Abläufe bei der Brandrauchbildung in Einzelräumen zu erwarten sind.

4.2 Messung der optischen Brandrauchdichte

Die durch Brandrauch verursachte Sichtbehinderung wird durch die Bestimmung der optischen Dichte des Brandrauches bzw. des Gemisches aus Luft und Brandrauch gekennzeichnet. Die Grundlage für diese Messungen ist das Gesetz der Lichtabsorption. Ein Strom monochromatischen Lichtes der Wellenlänge λ , der einen homogenen, absorbierenden Körper durchläuft, wird in jeder Schicht der Dicke dx um einen konstanten Bruchteil $dI(\lambda)$ seiner Intensität $I(\lambda)$ geschwächt. Dafür ergibt sich die Differentialgleichung

$$-\frac{dI(\lambda)}{I(\lambda)} = \sigma(\lambda) dx. \quad (4.1)$$

Nach einer Integration über die Strecke x gilt:

$$-\ln \frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)} = \sigma(\lambda)x \quad \text{bzw.} \quad (4.2)$$

$$I_2(\lambda) = I_1(\lambda) \cdot e^{-\sigma(\lambda)x} \quad (4.3)$$

Bei Annahme von Mittelwerten über einen bestimmten Wellenlängenbereich erhält man:

$$I_2 = I_1 \cdot e^{-\sigma \cdot x} \quad (4.4)$$

Zur Definition der Sichtbehinderung können die Gleichungen (4.3) und (4.4) herangezogen werden. Aus ihnen ergeben sich für die Beurteilung der optischen Brandrauchdichte folgende Größen:

- der Extinktionskoeffizient $\sigma(\lambda)$ oder als Mittelwert über einen bestimmten Wellenlängenbereich ; dieser Wert wird in der Literatur auch als optische Rauchdichte D/L in m^{-1} bezeichnet,
- die Extinktion $\sigma(\lambda) \cdot x$ und $\sigma \cdot x$,
- die Transmission $T(\lambda) = I_2(\lambda)/I_1(\lambda)$ oder als Mittelwert über eine bestimmte Wellenlänge $T = I_2/I_1$.

Die oben aufgeführten Beziehungen gelten auch für monochromatisches Licht nur dann, wenn der Strahlendurchgang durch einen optisch klaren, isotopen, homogenen und nicht lumineszierenden Stoff erfolgt. Ist eine dieser Bedingungen nicht erfüllt bzw. wird die Wellenlänge des Lichtes verändert, so können die Werte nicht miteinander verglichen werden.

4.3 Sichtbehinderung durch Brandrauch

Bei der Beurteilung der Sichtbehinderung durch Brandrauch sind verschiedene Fälle zu berücksichtigen /14/:

- In einem durch die allgemeine Raumbelichtung erhellten Rettungsweg müssen bei eingedrunenem Brandrauch die Umfassungswände sowie die Türen noch zu erkennen sein.

- Durch die Raumbelichtung angestrahlte besonders reflektierende Hinweisschilder müssen bei eingedrungenem Brandrauch noch zu erkennen sein.

- Selbstleuchtende oder blinkende Hinweisschilder müssen bei eingedrungenem Brandrauch noch zu erkennen oder zu lesen sein.

Umfangreiche Untersuchungen zu den beiden letztgenannten Punkten sind von Jin durchgeführt und in /15/ und /16/ beschrieben worden. Folgende wesentliche Erkenntnisse ergaben sich aus den Arbeiten. Nach /15/ liegt näherungsweise ein linearer Zusammenhang zwischen dem Extinktionskoeffizienten und der Sichtweite vor.

$$\sigma \cdot S = K \quad (4.5)$$

Die Sichtweite S eines Zeichens ergibt sich daraus zu:

$$S = \frac{K}{\sigma} \text{ in m} \quad (4.6)$$

Für reflektierende Zeichen liegt die Konstante K zwischen 2 und 4 (s. Bild 4.1). Dabei gilt der Wert 2 für schlecht reflektierende Hinweisschilder mit einem Reflektionsgrad von 0,13 und der Wert 4 für Hinweisschilder mit einem hohen Reflektionsgrad von 0,70. Die hier aufgeführten Werte ergaben sich aus Versuchen bei einer Raumbeluchtungsstärke von 40 lx.

Für selbstleuchtende Hinweisschilder liegt der Wert K zwischen 5 und 10 (s. Bild 4.2). Der Wert gilt dabei für eine Leuchtdichte der Schilder von 500 cd/m² und Schwelgase, der Wert 10 für Schilder mit einer Leuchtdichte von 2000 cd/m² und Brandrauch, der von einer Verbrennung herrührte. Die Raumbeluchtungsstärke betrug bei diesen Messungen 80 lx.

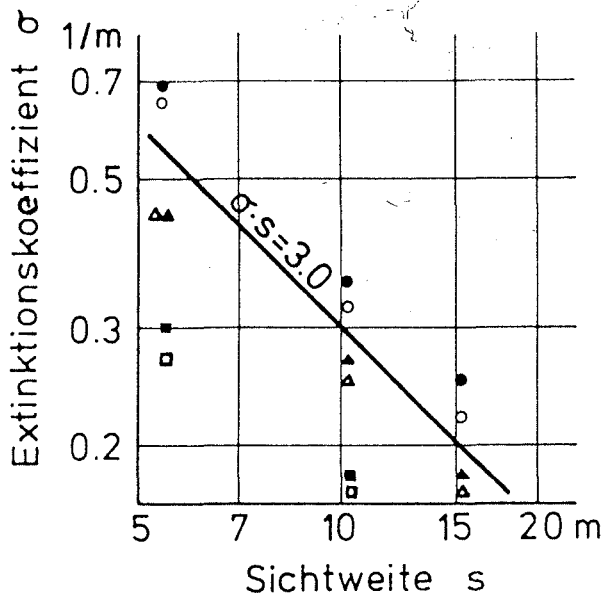


Bild 4.1:

Sichtweite reflektierender Hinweisschilder in Abhängigkeit von der optischen Brandrauchdichte (Extinktionskoeffizient) nach /15/

Reflexionsgrad Rauchentstehung

● 0,70
▲ 0,26
■ 0,13

durch Verbrennung

○ 0,70
△ 0,26
□ 0,13

durch Verschmelzung

Raumbeleuchtung 40 lx

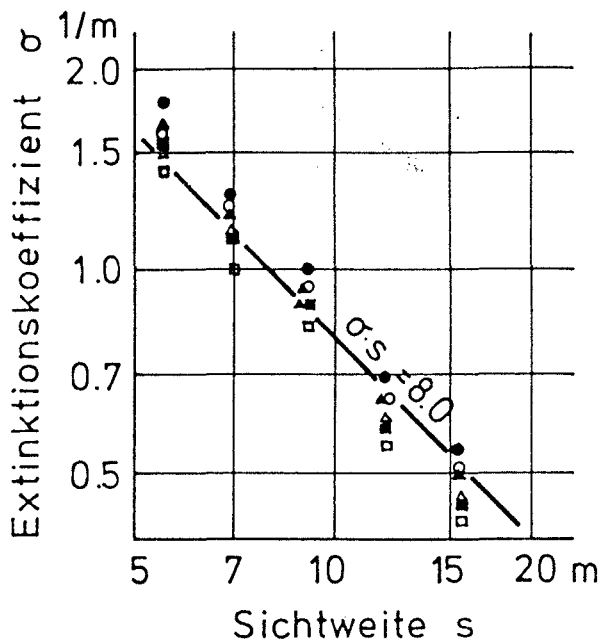


Bild 4.2:

Sichtweite eines selbstleuchtenden Hinweisschildes in Abhängigkeit von der optischen Brandrauchdichte (Extinktionskoeffizient) nach /15/

Leuchtdichte cd/m² Rauchentwicklung

● 2000
▲ 1000
■ 500

durch Verbrennung

○ 2000
△ 1000
□ 500

durch Verschmelzung

Raumbeleuchtung 80 lx

Aufgrund von Untersuchungen des spektralen Extinktionskoeffizienten für verschiedene Raucharten und für verschiedene Zeiten nach der Raucherzeugung ergibt sich nach /15/, daß die Sichtbarkeit von roten Zeichen um 20% bis 40% besser ist als für blaue Zeichen. Aus Bild 4.2 erkennt man, daß die ungünstigen Sichtverhältnisse durch "weißen Rauch", der bei der Verschwelung entsteht, hervorgerufen werden. In /15/ wurden auch Versuche zur Ermittlung der Sichtbarkeit und Lesbarkeit des selbstleuchtenden Hinweisschildes "FIRE EXIT" in einem 20 m langen Flur durchgeführt. Dabei wurde ein die Atemwege stark reizender Rauch durch die Verschwelung von Holz und ein schwach reizender schwarzer Rauch durch die Verbrennung von Kerosin erzeugt. Die Ergebnisse geben die Bilder 4.3 und 4.4 wieder. Bei den Untersuchungen wurde unterschieden, ob ein Hinweisschild nur als solches erkannt wurde (Sichtbarkeit) oder ob auch der Text des Schildes zu lesen war (Lesbarkeit). Für die Sichtbarkeit des Hinweisschildes "FIRE EXIT" kann in allen untersuchten Fällen von einem Wert $\sigma \cdot S = 4,5$ ausgegangen werden (siehe Bild 4.3). Um die Schrift lesen zu können, sind jedoch bei höheren Rauchkonzentrationen wesentlich kürzere Abstände der Personen zum Hinweisschild erforderlich (siehe Bild 4.4). Als unterer Grenzwert ergibt sich hier ein Wert $\sigma \cdot S$ von ca. 2,5.

In /17/ ist auch die Konzentrationsfähigkeit und Gehgeschwindigkeit von Personen untersucht worden, die sich in einem Raum befanden, in dem durch Verschwelung von Holz Rauchgase erzeugt wurden. Bei diesen Versuchen wurde die Herz- und Atemfrequenz mit gemessen. Zur Bestimmung der Konzentrationsfähigkeit wurde eine Vorrichtung verwendet, bei der nach Anweisung ein Metallstift so in verschieden große Bohrungen eingeführt werden mußte, daß der Stift nicht den Rand der Bohrung berührte.

Diese Untersuchungen wurden an insgesamt 48 Personen durchgeführt. 24 dieser Personen waren Mitarbeiter des Forschungsinstitutes, den übrigen Personen waren derartige Untersuchungen

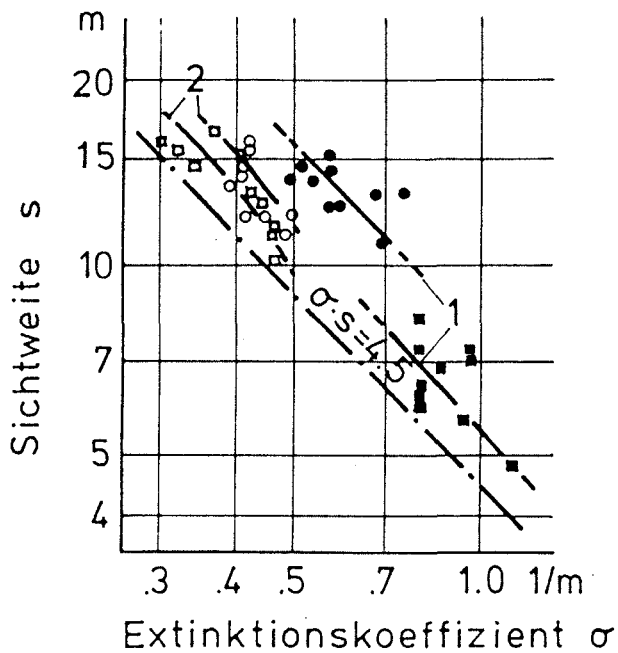


Bild 4.3:

Sichtweite des selbstleuchtenden Hinweisschildes "FIRE EXIT" in Abhängigkeit von der optischen Brandrauchdichte (Extinktionskoeffizient) nach /15/

1 schwach reizender Rauch (Verbrennung von Kerosin)

2 stark reizender Rauch (Verschmelzung von Holz)

○ ● normale Raumbelichtung

□ ■ ohne Raumbelichtung

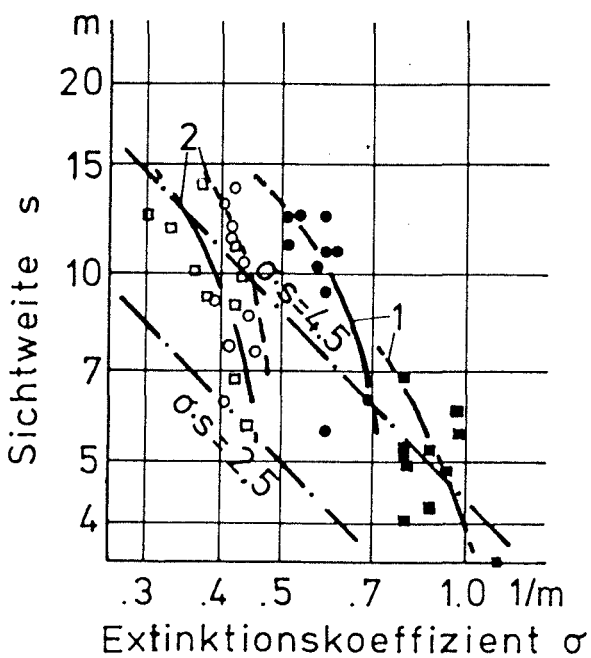


Bild 4.4:

Lesbarkeit des selbstleuchtenden Hinweisschildes "FIRE EXIT" in Abhängigkeit von der optischen Brandrauchdichte (Extinktionskoeffizient) nach /15/

1 schwach reizender Rauch (Verbrennung von Kerosin)

2 stark reizender Rauch (Verschmelzung von Holz)

○ ● normale Raumbelichtung

□ ■ ohne Raumbelichtung

sowie die Räumlichkeiten unbekannt. Die Auswertung der Versuchsergebnisse hat ergeben, daß sich diese Gruppen wesentlich unterscheiden. Die Beeinflussung durch den Brandrauch war bei der 1. Gruppe (Mitarbeiter) wesentlich geringer als bei der 2. Gruppe (Allgemeinheit). Die zulässigen Grenzwerte der Brandrauchkonzentration sind daher auch unterschiedlich für Personen, die an Brandrauch gewöhnt und mit den Räumlichkeiten vertraut sind, zu denjenigen, denen diese Situation und die Örtlichkeiten neu sind. Für die erste Gruppe (Mitarbeiter) ergab sich als zulässiger Grenzwert ein Extinktionskoeffizient von $\sigma = 0,5 \text{ m}^{-1}$ bei einer Sichtweite von 4 m. Für die 2. Gruppe (Allgemeinheit) darf der Extinktionskoeffizient den Wert $\sigma = 0,15 \text{ m}^{-1}$ bei einer Sichtweite von 13 m nicht überschreiten.

4.4 Zulässige Rauchdichten in Rettungswegen

Aufgrund der vorliegenden Literaturangaben und eigener Erfahrungen wurden von John /14/ die im folgenden genannten zulässigen Verhältnisse in einem Rettungsweg bezüglich der Sichtverhältnisse abgeschätzt. Für die Abschätzung der Sichtverhältnisse wird ein 25 m langer Flur angenommen. Um auf die Entfernung von 25 m ein reflektierendes Hinweisschild zu erkennen, ist mit einem Wert von $\sigma \cdot S = 3$ nach Bild 4.1 eine maximal zulässige optische Rauchdichte entsprechend einem Extinktionskoeffizient von

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{3}{25} = 0,12 \text{ m}^{-1}$$

zulässig. Dabei ist nach Bild 4.1 für das Hinweisschild ein Reflexionsgrad von ca. 0,7 erforderlich. Für ein selbstleuchtendes Hinweisschild mit einer Leuchtdichte von ca. 1000 cd/m² und einer allgemeinen Raumbeluchtungsstärke im Flur von 80 lx darf der maximale Wert des Extinktionskoeffizienten für $\sigma \cdot S = 8$ nach Bild 4.2 den Wert

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{8}{25} = 0,32 \text{ m}^{-1}$$

nicht überschreiten.

Legt man die Verhältnisse nach Bild 4.3 zugrunde, so darf für einen Wert $\sigma \cdot S = 4,5$ der maximale Extinktionskoeffizient den Wert

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{4,5}{25} = 0,18 \text{ m}^{-1}$$

nicht überschreiten. Ist es erforderlich, daß der Text der Hinweisschilder gelesen werden kann, so ist die zulässige Rauchgaskonzentration weiter zu verringern. Nach Bild 4.4 ergibt sich mit $\sigma \cdot S = 2,5$ ein Wert von

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{2,5}{25} = 0,1 \text{ m}^{-1}$$

Aufgrund der in /17/ durchgeführten Untersuchungen beträgt der zulässige Extinktionskoeffizient für Personen, die nicht an Brandrauch gewöhnt und nicht mit den Örtlichkeiten vertraut sind,

$$\sigma_{\text{zul}} = 0,15 \text{ m}^{-1}$$

Da ab einem Extinktionskoeffizienten von $\sigma = 0,15 \text{ m}^{-1}$, verursacht durch die Verschmelzung von Holz, der Pulsschlag anstieg und das Konzentrationsvermögen nachließ, ist dies als Maximalwert anzusehen, auch wenn bezüglich der Sichtverhältnisse im Einzelfall höhere optische Brandrauchdichten zulässig wären.

4.5 Erforderliche Verdünnung des Brandrauches aus optischen Gründen

Der bei einem Brand entstehende Brandrauch hat eine wesentlich höhere optische Rauchdichte als der im vorhergehenden Abschnitt ermittelte Grenzwert des Extinktionskoeffizienten von $\sigma_{zul} = 0,15 \text{ m}^{-1}$. Der in Rettungswege eindringende Brandrauch führt daher je nach den örtlichen Bedingungen und der vorhandenen Öffnung zwischen Brandraum und Rettungsweg innerhalb kurzer Zeit (s. Abschnitt 4.7) zu einer starken Verqualmung, so daß sie unpassierbar werden. Durch bauliche Maßnahmen oder durch mechanische Druckbelüftungssysteme ist es möglich, Rettungswege im Brandfall passierbar zu halten. Sind die zulässigen Extinktionskoeffizienten in den Rettungswegen bekannt, so kann die Auslegung so erfolgen, daß im ungünstigsten Fall gerade soviel Brandrauch in die Rettungswege eintritt, daß die zulässige Extinktion nicht überschritten wird.

Für Lüftungssysteme, bei denen der in Rettungswege eingedrungene Brandrauch verdünnt wird, ist der erforderliche Verdünnungsgrad und damit der Luftvolumenstrom zu berechnen. Die zulässige Brandrauchkonzentration ist durch die maximale optische Rauchdichte in den Brandgasen festgelegt. Als Verdünnungsgrad v des Brandrauches wird nach John /14/ das Verhältnis des Anteiles des Zuluftvolumenstromes, der nicht zur Verbrennung unter stöchiometrischen Bedingungen benötigt wird, zum theoretischen Brandrauchvolumenstrom bei stöchiometrischer Verbrennung bezeichnet. Liegt die Mischungstemperatur über 100°C , so wird das im Brandrauch enthaltene Wasser als Wasserdampf volumenmäßig mitberücksichtigt.

$$v = \frac{\dot{V}_{ZL} - \dot{V}_{Lst}}{\dot{V}_{BRst}} \quad (4.7)$$

Für die Verbrennung von Holz sind nach /14/ folgende Werte bezogen auf 0°C und 1,013 bar in Gleichung (4.7) einzusetzen:

- $V_{L \text{ st}} = 3,60 \text{ m}^3/\text{kg}$
- $V_{BR \text{ st tr}} = 3,61 \text{ m}^3/\text{kg}$ für $t_{BR} < 100^\circ\text{C}$
- $V_{BR \text{ st f}} = 4,31 \text{ m}^3/\text{kg}$ für $t_{BR} \geq 100^\circ\text{C}$

Bei der Verbrennung von Heizöl sind folgende Werte bezogen auf 0°C und 1,013 bar zu berücksichtigen:

- $V_{L \text{ st}} = 11,08 \text{ m}^3/\text{kg}$
- $V_{BR \text{ st tr}} = 10,35 \text{ m}^3/\text{kg}$ für $t_{BR} < 100^\circ\text{C}$
- $V_{BR \text{ st f}} = 11,80 \text{ m}^3/\text{kg}$ für $t_{BR} \geq 100^\circ\text{C}$

Auf Bild 4.5 sind die von John /14/ ermittelten Verdünnungsgrade für Heizöl- (Kurve 1) und Holzbrände (Kurve 2) dargestellt. Die erforderliche Verdünnung des Brandrauches bezüglich der Sichtbarkeit von Rettungswegen ist anhand der vorliegenden Messungen in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1: Erforderliche Brandrauchverdünnung für Heizöl- und Holzbrände

$\sigma_{zul} / \text{m}^{-1} /$	Verdünnungsgrad v	
	Heizöl	Holz
0.15	1380	18
0.25	800	11
0.32	400	8

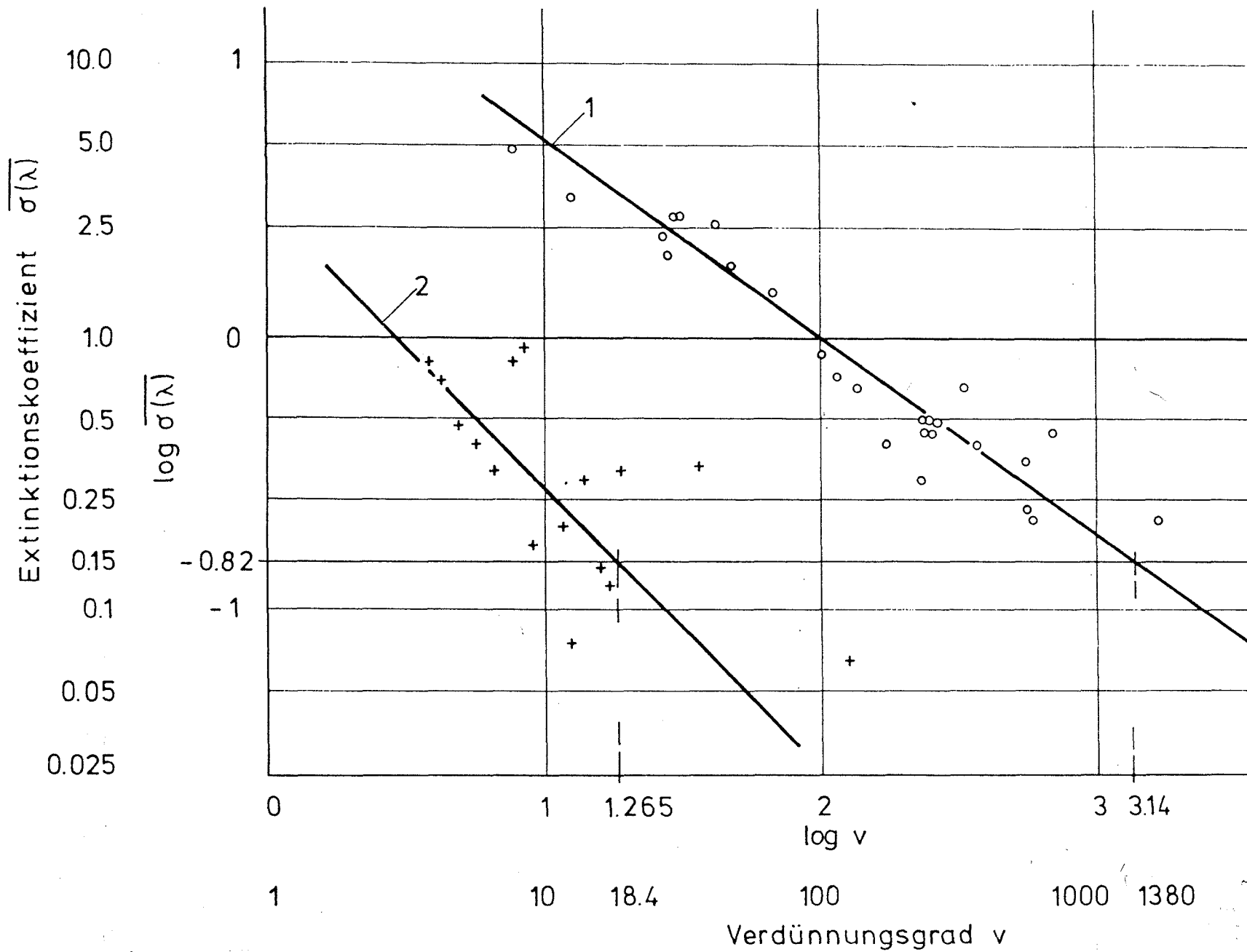


Bild 4.5: Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten vom Verdünnungsgrad n bei der Verbrennung von Heizöl EL (1) und Holz (2)

4.6 Erforderliche Verdünnung des Brandrauches aus toxischen Gründen

Es wurde bereits erwähnt, daß Brandrauch in mehrfacher Weise Gesundheitsgefahren hervorruft. Daher ist zu prüfen, welche Mengen an Frischluft dem Brandrauch zugemischt werden müssen, damit auf den Rettungswegen ein Brandrauch-Luftgemisch entsteht, welches eine Gesundheitsgefährdung ausschließt. Dies kann grundsätzlich dadurch geschehen, daß man einerseits die chemische Zusammensetzung des Brandrauches analysiert und zum anderen maximal zulässige Gaskonzentrationen definiert, die als gesundheitlich ungefährlich eingestuft werden können. Aus dem Quotienten der gemessenen und zulässigen Konzentrationen erhält man den erforderlichen Verdünnungsgrad für den Brandrauch.

Die chemische Zusammensetzung des Brandrauches ist wesentlich von der Art der brennenden Stoffe sowie von den Belüftungsverhältnissen des Brandortes abhängig. Damit ändern sich auch in sehr weiten Grenzen die Anteile der einzelnen Stoffe. Aus verschiedenen Versuchen ergaben sich die folgenden Maximalwerte für die einzelnen Bestandteile im Brandrauch.

Bei verschiedenen Versuchen in Mobil-Homes wurden nach /18/ maximal 21% CO₂ und 8% CO gemessen. Ähnliche Maximalwerte, 21% CO₂ und 7% CO, ergaben sich auch bei Wohnungsbränden nach /19/. Bei Brandversuchen in einer NBS-Kammer wurden nach /20/ bei der Verbrennung von Kunststoffen für die Innenverkleidung von Flugzeugkabinen folgende Maximalwerte ermittelt:

CO	HCN	NO+NO ₂	SO ₂	HF	HCl
1000 ppm	15 ppm	17 ppm	15 ppm	30 ppm	430 ppm

Die Zahl und Konzentration der im Brandrauch auftretenden Gasanteile können sich durch die Verwendung von gasförmigen Löschmitteln noch wesentlich erhöhen. Beim Löschen mit Halon 1211 oder Halon 1301 entstehen durch die Zersetzung des Löschmittels in der Flamme bzw. an heißen Oberflächen Spaltprodukte wie HF, HCl oder HBr u.a., die die Gesamtkonzentration dieser Stoffe im Brandrauch erhöhen. In verschiedenen Untersuchungen wurden folgende maximalen Konzentrationen gemessen:

HF	HCl	COCl
1700 ppm	6000 ppm	1 ppm

In Tabelle 4.2 sind die von John /14/ ermittelten Werte für die aufgrund der obigen Daten für erforderlich gehaltenen Verdünnungsgrade angegeben. Dabei wurde angenommen, daß die obigen Gaskonzentrationen sich auf Verbrennungsvorgänge beziehen, die bei zweifachem Luftwechsel gemessen wurden. Die zulässigen Konzentrationswerte in Tabelle 4.2 sind nach /20/, /21/ und /22/ festgelegt. Sie beziehen sich auf Einwirkzeiten von ca. 30 Minuten. Als Vergleichswert ist in Tabelle 4.2 der MAK-Wert aufgeführt.

Aus der Tabelle 4.2 folgt, daß sich durch den CO-Gehalt im Brandrauch die größte Gesundheitsgefährdung ergibt. Der erforderliche Verdünnungsgrad liegt bei $v = 200$. Für alle übrigen Gase liegen die Verdünnungsgrade unter 200. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, daß diese Angaben nicht den Einsatz von z.B. CO₂- und Halon-Löschanlagen berücksichtigen. Prinzipiell ist jedoch festzustellen, daß die erforderlichen Verdünnungsgrade v zur Konzentrationsabsenkung durchweg geringer sind als z.B. diejenigen, die zur Aufrechterhaltung der Sichtbarkeit in Rettungswegen dienen. Daraus folgt, daß die erforderlichen Luftwechselraten in geschlossenen Systemen i.w. anhand der vorgenannten optischen Kriterien festzulegen sind.

Tabelle 4.2: Zulässige Gaskonzentrationen in der Atemluft nach verschiedenen Quellen, Brandrauchzusammensetzung und erforderliche Verdünnungsgrade

1	2	3	4	5	6	7
Stoffe	Formel	MAK-Werte nach /21/ ppm	zul. Konzen- trations- werte /20,22/ ca. 30 min ppm	gemessene Konzentra- tionswerte (2-facher Luftw.) ppm	Verhältnis Spalte 5 : Spalte 4 [-]	Verdünnungs- grad v [-]
Carbonylchlorid (Phosgen)	COCl ₂	0,1	1	1	1	2
Chlorwasserstoff	HCl	5	35	430	12	24
Fluorwasserstoff	HF	3	30	30	1	2
Kohlendioxid	CO ₂	5000	10 000	210 000	21	42
Kohlenmonoxid	CO	30	800	80 000	100	200
Schwefeldioxid	SO ₂	2	20	15	1	2

4.7 Berechnung der Brandrauchbildung

Die Berechnung der Brandrauchbildung in Gebäuden ist derzeit nur näherungsweise möglich. Vor allem wurde über die meßtechnische Erfassung der Rauchdichte bislang international keine Einigkeit erzielt. Unabhängig davon werden in der Praxis verschiedene Rauchabzugs- und Verqualmungsmodelle angewandt. Allgemein wird dabei von folgenden Methoden ausgegangen:

- Berechnung und Bemessung der Verqualmung und des Rauchabzugs nach der Wärmebilanztheorie,
- Bemessung des erforderlichen Rauchabzugs nach den Richtlinien der Sachversicherer,
- Bemessung des erforderlichen Rauchabzugs nach der DIN 18232,
- Berechnung und Bemessung der Brandrauchbildung auf der Grundlage der Rauchentwicklungstheorie.

Im folgenden wird eine Methode vorgeschlagen, die sich auf die letztgenannte Möglichkeit bezieht.

Der Extinktionskoeffizient σ läßt sich aus der spezifischen optischen Rauchdichte D_s oder der spezifischen optischen Massenrauchdichte D_m bestimmen. Es gelten folgende Beziehungen:

$$D_s = \sigma \cdot V/A \quad (4.7)$$

darin sind

V - das verqualmte Volumen in m^3 mit einem mittleren Extinktionskoeffizienten σ

und

A - Oberfläche in m^2 des brennenden oder nur qualmenden Materials

Die spezifische Massenrauchdichte ist wie folgt definiert:

$$D_m = \sigma \cdot V / \Delta m \quad (\text{m}^2/\text{kg}) \quad (4.8)$$

worin

- Δm den Masseverlust wiedergibt, der bei dem vorliegenden Material entsteht, wenn ein Wärmestrom $\dot{q} \cdot A$ (W) für Δt (s) ansteht und die Pyrolysisations- bzw. Verdampfungswärme H_v (J/kg) verbraucht wird:

$$\Delta m = \dot{q} \cdot \Delta t \cdot A / H_v \quad (4.9)$$

Für einige typische Materialien sind Werte von H_v , D_s und D_m in der Tabelle 4.3 angegeben.

Tabelle 4.3: Werte der spezifischen optischen Rauchdichte und Massenrauchdichte einiger typischer Materialien

Material	H_v (J/kg)	D_s (1)	D_m (m ² /kg)
Holz	6000	108 - 287	220 - 280
Polyurethan	1520	-	200 - 500
PVC	-	220 - 320	-
Polypropylen	2030	100 - 200	400
Polystyrol	1760	230 - 660	800
ABS	-	390 - 660	520
Neoprene	-	-	340 - 550
Gipsplatten	-	23 - 37	-

Der Wertebereich von D_s liegt üblicherweise zwischen 10 und 660, wöhringegen die D_m -Werte zwischen 200 und 800 angesiedelt sind. Materialien die stark qualmen zeigen üblicherweise auch große Gewichtsverluste. Hierbei ist zu beachten, daß z.B. Baustoffe die Feuchtigkeit absorbieren u.U. falsch bewertet werden.

Sofern die Brandausbreitung v_g (m/min) in einem vorgegebenen Brandraum und die zugehörige spezifische Rauchdichte des brennenden Materials bekannt sind, läßt sich der zugehörige Zeitraum t_Q bis zur Verqualmung berechnen, wenn man die erforderliche Sichtweite z.B. gemäß Bild 4.1 bis 4.4 festlegt:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{D_s}{\sigma} \cdot \dot{A}(t) \quad (4.10)$$

$$V = \frac{D_s}{\sigma} \cdot \int_0^{t_Q} \dot{A}(t) \cdot dt \quad (4.11)$$

Bei einer Breite B der Flammenfront, die sich mit der Geschwindigkeit v_g ausbreitet erhält man daraus:

$$t_Q = \frac{V \cdot \sigma}{D_s \cdot B \cdot v_g} \quad (4.12)$$

Für die spezifische optische Massenrauchdichte erhält man aufgrund ähnlicher Überlegungen:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{D_m}{\sigma} \cdot \frac{\dot{q} \cdot A(t)}{H_V} \quad (4.13)$$

$$V = \frac{D_m}{\sigma} \cdot \int_0^{t_Q} \frac{\dot{q} \cdot A(t)}{H_V} \cdot dt \quad (4.14)$$

Für den einfachen Sonderfall, daß die Wärmestromdichte und Verdampfungswärme konstant sind und der Brandherd A sich nicht ausbreitet, gilt:

$$t_Q = \frac{V \cdot \sigma \cdot H_V}{D_m \cdot \dot{q} \cdot A} \quad (4.15)$$

In beiden Fällen läßt sich t_Q als ein Zeitraum definieren, der bis zur Verqualmung zur Verfügung steht, und in dem z.B. Flucht-, Lösch- und Rettungsmaßnahmen unbehindert durchführbar sind. Üblicherweise beträgt dieser Zeitraum nur wenige Minuten, wie sich anhand einfacher Beispiele leicht zeigen läßt.

1. Beispiel: PVC-Brand mit entwickelter Flamme, Sichtweite 10 m

$$D_s = 250, V = 400 \text{ m}^3$$

$$v_g = 0.1 \text{ m/min}, B = 1.0 \text{ m},$$

$$\text{nach Bild 4.1} \rightarrow \sigma = 0.3 \text{ m}^{-1}$$

$$t_Q = \frac{400 \cdot 0.3}{250 \cdot 1.0 \cdot 0.1} = \underline{4.8 \text{ min}}$$

2. Beispiel: Polyurethanschaum mit nichtleuchtender Flamme, Sichtweite 10 m

$$D_m = 500, V = 400 \text{ m}^3$$

$$\dot{q} = 0.5 \text{ W/cm}^2, A = 10^4 \text{ cm}^2, H_v = 1.5 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$$

$$\text{nach Bild 4.1} \rightarrow \sigma = 0.3 \text{ m}^{-1}$$

$$t_Q = \frac{400 \cdot 0.3 \cdot 1.5 \cdot 10^6}{500 \cdot 0.5 \cdot 10^4} = \underline{72 \text{ s}}$$

Für den Fall, daß sich der Brandherd A linear mit der Geschwindigkeit v_g vergrößert, erhält man aus Gl. (4.14)

$$t_Q = \left(\frac{2 \cdot V \cdot \sigma \cdot H_v}{D_m \cdot \dot{q} \cdot B \cdot v_g} \right)^{1/2} \quad (4.16)$$

Die zugehörige Fluchtzeit ergibt sich dann zu ($v_g = 10 \text{ cm/60s}$)

$$t_Q = \left(\frac{2 \cdot 400 \cdot 0.3 \cdot 1.5 \cdot 10^6 \cdot 60}{500 \cdot 0.5 \cdot 10^2 \cdot 10} \right)^{1/2} = \underline{322 \text{ s}}$$

Die vorstehenden Berechnungen beziehen sich auf Räume ohne Rauchabzug. Sofern ein Rauchabzug \dot{V}_{ab} (m^3/s) berücksichtigt werden soll, kann von folgender allgemeiner Formel ausgegangen werden:

$$\int_0^t (\frac{\partial V}{\partial t} + \dot{V}_{ab}) dt = \int_0^t \frac{D_m}{\sigma} \cdot \dot{q} \cdot A/H_V \cdot dt \quad (4.17)$$

Aus Gl. (4.17) läßt sich die erforderliche Frischluftmenge berechnen, um bei einem vorgegebenen Brand in dem Volumen V eine gewünschte Sichtweite ($\partial V/\partial t = 0$) einhalten zu können.

$$\dot{V}_{ab} = \frac{D_m}{\sigma} \cdot \frac{\dot{q} \cdot A}{H_V} \quad (4.18)$$

Für das Beispiel 2 ergibt sich daraus folgender Wert:

$$\dot{V}_{ab} = \frac{500}{0.3} \cdot \frac{0.5 \cdot 10^4}{1.5 \cdot 10^6} = \underline{\underline{5.55 \text{ m}^3/\text{s}}}$$

Der o.g. Volumenstrom (5-facher Luftwechsel) ist erforderlich, um eine Sichtweite von 10 m zu gewährleisten. Bezieht man diese Verhältnisse (5 kW Brandleistung) auf ein 5000 m^3 großes Volumen, so ergibt sich immerhin noch ein erforderlicher 3.5-facher Luftwechsel zur Rauchfreihaltung bei 10 m Sichtweite. Die Beispiele zeigen, daß im Fall einer Rauchverschleppung mit vergleichsweise kleinen Sichtweiten zu rechnen ist, wenn kein ausreichender Luftwechsel besteht. Dies ist in geschlossenen Systemen üblicherweise der Fall.

5. Ermittlung des Druckaufbaus in geschlossenen Systemen

5.1 Grundlagen

Zur Erfassung des Druckaufbaus beim Brand betrachtet man die Änderung der inneren Energie im geschlossenen Volumen:

$$\frac{d}{dt} \int_{(V)} (\rho \cdot e) dV = \dot{Q}_{zu} - \dot{Q}_{ab} \quad \text{bzw. die} \quad (5.1)$$

Änderung der inneren Energie im Volumen mit Zu- bzw. Abflüssen:

$$\frac{d}{dt} \int_{(V)} (\rho \cdot e) dV + \int_{(S)} \rho \cdot u \cdot h \cdot dS = \dot{Q}_{zu} - \dot{Q}_{ab} \quad (5.2)$$

Für isochore Zustandsänderungen erhält man aus dem idealen Gasgesetz:

$$\frac{d}{dt} \int_{(V)} (\rho \cdot e) dV = V \cdot \rho_v \cdot c_v \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{V}{\kappa - 1} \frac{dp}{dt} \quad (5.3)$$

Der Enthalpieabfluß (+) bzw. -zufluß (-) ergibt sich zu:

$$\int_{(S)} \rho \cdot u \cdot h \cdot dS = \int_{(S)} \rho \cdot c_p \cdot T \cdot u \cdot dS = \sum_{ab/zu}^j \dot{m}_{v,j} \cdot c_{p,j} \cdot T_{v,j} \quad (5.4)$$

Die zugeführte Wärmeenergie entsteht durch den Abbrand mit der Geschwindigkeit \dot{R} :

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_B = \dot{R} \cdot H_u \quad (5.5)$$

Die durch Konvektion und Radiation abgeführte Wärmeenergie kann als Parameter aufgefaßt werden:

$$\dot{Q}_{ab} = \lambda \cdot \dot{Q}_B \quad (5.6)$$

Für genauere Betrachtungen gilt:

$$\dot{Q}_{ab} = A \cdot (\alpha_k + \alpha_{str}) \cdot (T - T_o) \quad (5.7)$$

Sofern die Dichte $\rho = M/V$ konstant ist, erhält man daraus

$$\dot{Q}_{ab} = \alpha \cdot A \cdot T_o (P/P_o - 1) \quad (5.8)$$

Die Massenbilanz im geschlossenen System ergibt sich zu:

$$\frac{d}{dt} \int_{(V)} \rho \, dV = 0 \quad (5.9)$$

Sofern das Volumen nicht konstant ist und Ab- bzw. Zuflüsse zu berücksichtigen sind gilt:

$$\frac{d(\rho V)}{dt} + \int_{(S)} \rho \cdot u \cdot dS = 0 \quad (5.10)$$

Bei konstanter Grundfläche A gilt im isochoren Fall:

$$A \cdot \rho \cdot \frac{dy}{dt} + \sum_{ab/zu}^j \dot{m}_j = 0 \quad (5.11)$$

Die Koordinate y beschreibt die Höhe des betrachteten Gaskörpers (s. Bild 5.1)

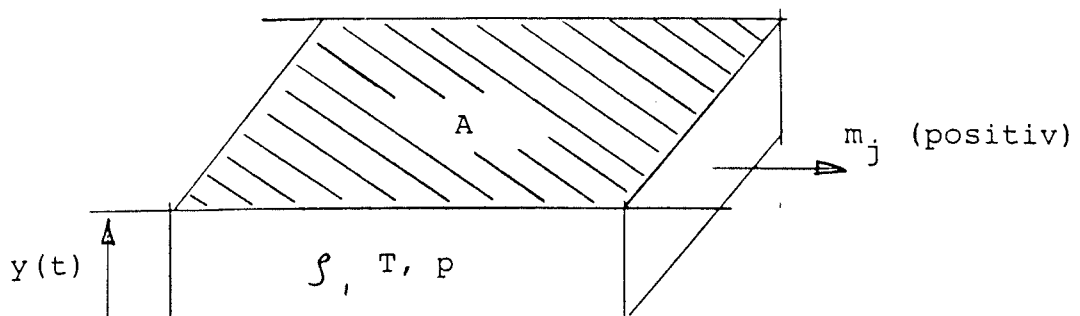


Bild 5.1: Kontrollvolumen einer Gasschicht mit veränderlicher Höhe

5.2 Berechnung des Druckaufbaus bei gleichzeitiger Luftabfuhr

Aus Gl. (5.2) bis (5.6) ergibt sich für den Druckaufbau im geschlossenen System:

$$\frac{V}{\kappa-1} \frac{dp}{dt} + \sum_j m_j c_{pj} T_j = (1-\lambda) \dot{Q}_B \quad (5.12)$$

Im vorliegenden Fall wird angenommen, daß heiße Gase nicht abführbar sind, so daß sich für den Normalfall

$$\frac{V}{\kappa-1} \frac{dp}{dt} = (1 - \lambda) \dot{Q}_B - \dot{m}_e c_p T_e \quad (5.13)$$

ergibt. Darin ist \dot{m}_e die abgeführte (kalte) Frischluft. Für den Wärmeverlust infolge Konvektion gilt Gl. (5.7). Nach Einführung der idealen Gasgleichung erhält man daraus

$$\dot{Q}_C = \alpha_c A_c \left(\frac{p}{\rho_g R_g} - \frac{p_e}{\rho_e R} \right), \quad (5.14)$$

wobei für die mittlere Dichte

$$\rho_g = \rho = \frac{M}{V} = \frac{M_0 + (\dot{R} - \dot{m}_e) t}{V} \quad (5.15)$$

angenommen werden kann. Für den Fall, daß $R_g \approx R$ ist und sich für $(\dot{R} - \dot{m}_e) t/V \ll \rho_0$ ergibt, erhält man aus Gl. (5.12) bis (5.14)

$$\frac{V}{\kappa-1} \frac{dp}{dt} + \alpha_c A_c T_e \frac{p - p_e}{p_e} = \dot{Q}_B - \dot{m}_e c_p T_e \quad (5.16)$$

Für die stationäre Druckerhöhung ergibt sich daraus ($dp/dt = 0$):

$$\frac{\Delta p_{st}}{p_e} = \frac{\dot{Q}_B - \dot{m}_e c_p T_e}{\alpha_c A_c T_e} \quad (5.17)$$

Diese Gleichung ist in der folgenden Tabelle 5.1 für ein Volumen mit 5.000 m³ Inhalt ausgewertet, wobei ungünstig eine rein konvektive Wärmeübergangszahl von $\alpha_e = 0.01163$ kW/m² angenommen wurde. Die absorbierenden Flächen A_c und die Luftzufuhr \dot{m}_e sind jeweils als Parameter aufgefaßt. In dem betrachteten Raum sind Kühlaggregate nicht vorhanden.

Aus Tabelle 5.1 geht hervor, daß die theoretischen Enddrücke bei mittleren Bränden (20.000 kW), selbst unter Annahme günstiger Wärmeabfuhrbedingungen, für $\dot{m}_e = 0$ (keine zusätzliche Luftabfuhr) nahezu den 2-fachen Wert von p_e erreichen! Großbrände mit 100.000 kW sind vom Druckaufbau her praktisch nicht zu kontrollieren. Die errechneten Werte $\Delta p_{st}/p_e > 5$ sind so hoch, daß sie praktisch nicht vorkommen können und somit als rein theoretisch aufzufassen sind. Aufgrund der Vernachlässigung von Gl. (5.15) ergeben sich nur näherungsweise richtige Werte, die Tendenzen sind jedoch eindeutig.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang der zeitliche Ablauf der Druckerhöhung. Setzt man Gl. (5.17) in Gl. (5.16) ein, so erhält man nach einigen Umformungen folgende Beziehung:

$$\frac{d\Delta p/\Delta p_{st}}{dt} = c \cdot \{ 1 - \Delta p/\Delta p_{st} \} \quad (5.18)$$

Die Konstante C ist wie folgt definiert:

$$C = \frac{\alpha_c A_c}{V c_v \rho_e} \quad (5.19)$$

Nach Integration von Gl. (5.18) erhält man unter Beachtung der zugehörigen Randbedingungen:

$$\Delta p/\Delta p_{st} = 1 - \exp \left(- \frac{\alpha_c A_c}{V c_v \rho_e} \cdot t \right) \quad (5.20)$$

Die Auflösung nach t ergibt

$$t = \frac{1}{C} \ln \frac{1}{1 - \Delta p / \Delta p_{st}} \quad (5.21)$$

Tabelle 5.1: Stationärer Druckanstieg in einem 5.000 m³ Brandraum bei verschiedenen Bränden unter geringer Luft- und Wärmeabfuhr

\dot{m}_e kg/s	A_c m ²	$\Delta p_{st} / p_e$		
		2.000 kW	20.000 kW	100.000 kW
0.0	1.000	0.587	5.87	29.35
	2.000	0.293	2.94	14.67
	3.000	0.196	1.96	9.78
2.0	1.000	0.414	5.69	19.17
	2.000	0.207	2.85	14.59
	3.000	0.138	1.89	9.72
5.0	1.000	0.155	5.44	28.91
	2.000	0.078	2.72	14.46
	3.000	0.052	1.81	9.64

Für die o.g. Verhältnisse ergeben sich die in Tabelle 5.2 aufgeführten Zeiträume für den relativen Druckanstieg $\Delta p / \Delta p_{st}$.

Tabelle 5.2: Zeitraum t bis zur Erreichung verschiedener Verhältnisse $\Delta p/\Delta p_{st}$ im 5.000 m³ Brandraum

A_c m ²	1/C s	Zeitraum t in s bis zur Erreichung von $\Delta p/\Delta p_{st}$						
		0.01	0.05	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1.000	378	3.8	19.4	39.8	134.8	262.0	455.1	870.4
2.000	189	1.9	9.7	19.9	67.4	131.0	227.6	435.2
3.000	126	1.3	6.5	13.3	44.9	87.3	151.7	290.1

Aus den Tabellenwerten geht hervor, daß ein relativer Druckanstieg $\Delta p/\Delta p_{st} = 0.1$ in allen drei Fällen in etwa einer halben Minute eintritt. Neunzig Prozent des zu erwartenden Enddrucks werden in 5 bis 15 Minuten erreicht. Man erkennt daran, daß der Druckanstieg in geschlossenen bzw. nahezu geschlossenen Brandräumen außerordentlich rasch erfolgt. Der praktisch tätigen Feuerwehr sind solche Druckanstiege indirekt bekannt, da selbst bei kürzesten Einsatzzeiten, unter ungünstigen Bedingungen erste Verpuffungen mit Beginn der Löscharbeiten oftmals Hand in Hand gehen. Die Gefährlichkeit solcher Phänomene braucht hier nicht sonderlich hervorgehoben zu werden.

Es bleibt noch zu klären, inwieweit die im geschlossenen Volumen vorliegenden Sauerstoffmengen einen Brand unterhalten können. Ein Luftvolumen von 5.000 m³ enthält etwa 1.160 kg Sauerstoff. Zur Verbrennung von 1 kg Öl werden etwa 13.0 Luft bzw. 3.0 kg Sauerstoff benötigt. Bei Abbrandgeschwindigkeiten von $\dot{R} = 0.5$ kg/s werden innerhalb von 10 Minuten maximal 300 kg Öl verbrannt, wozu etwa 900 kg Sauerstoff benötigt werden. Man erkennt daran, daß unter den vorliegenden Bedingungen ausreichender Sauerstoff für mindestens 5 bis 10 Minuten zur Verfügung steht.

Nach Tab. 5.2 werden die stationären Enddrücke in diesem Zeitraum zu 50 bis 70 Prozent erreicht. Selbst kleinere Brände führen somit unter diesen Bedingungen zu erheblichen Druckerhöhungen (vergl. Tabelle 5.1, $\dot{Q}_B = 2.000$ kW).

Für einen großen Brandraum mit 50.000 m³ Inhalt ergeben sich für den Fall, daß keine Luft abgeführt wird, die in Tabelle 5.3 zusammengestellten stationären Enddrücke. Die Druckanstiege nehmen im vorliegenden Fall nur bei Zugrundelegung eines Großbrandes kritische Werte an. Ein Brand mit $\dot{Q}_B = 20.000$ kW entspricht im übrigen einem Ölbrand mit einer Abbrandgeschwindigkeit von etwa 0.5 kg/s.

Tabelle 5.3: Stationärer Druckanstieg bei einem 50.000 m³ Brandraum bei verschiedener Wärmeabfuhr ($\dot{m}_e=0.0$)

A _c m ²	$\Delta p_{st} / p_e$		
	2.000 kW	20.000 kW	100.000 kW
4.000	0.1467	1.4673	7.3366
8.000	0.0734	0.7337	3.6683
16.000	0.0367	0.3668	1.8341
32.000	0.0183	0.1834	0.9171

Die unter diesen Bedingungen zu erwartenden Zeitabläufe für die Druckanstiege gemäß Gl. (5.20) sind auf der Tabelle 5.4 angegeben. Innerhalb von 3 bis 10 Minuten wird danach 50 % des stationären Enddruckes erreicht ($\Delta p / \Delta p_{st} = 0.5$). Bei guter Wärmeabfuhr durch Wärmeleitung sind die relativen Druckanstiege vergleichsweise höher, allerdings erreichen die Enddrücke dann auch nur Minimalwerte (vergl. Tab. 5.3). Im Fall geringer Wärmeaufnahme durch die Umfassungsbauteile kehren sich die Verhältnisse um.

$$\dot{m}_z = A_z \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_o \cdot (p_o - p)} \quad (5.24)$$

A_z ist der effektive Strömungsquerschnitt im System. Ersetzt man den Unterdruck $p_o - p$ durch X , so erhält man nach einigen Umformungen aus Gl. (5.22) bis (5.24)

$$\frac{dX}{dt} + A \cdot X^{1/2} = -B \quad (5.25)$$

worin

$$A = \frac{(\chi-1) \cdot A_z \cdot c_p \cdot T_o \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_o}}{V} \quad (5.26)$$

und

$$B = \frac{(\chi-1) \cdot (1-\lambda) \cdot \dot{Q}_B}{V} \quad (5.27)$$

sind. Der Druckanstieg zum Zeitpunkt $t = 0$ ist durch

$$\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\substack{t=0 \\ p=p_u}} = A \cdot (p_o - p_u)^{1/2} + B \quad (5.28)$$

gegeben. Der Anstieg ist umgekehrt proportional zum vorhandenen Volumen V . Im folgenden wird zunächst Gl. (5.28) ausgewertet und zwar für Systeme mit 5000 m^3 und 50.000 m^3 Volumen. Mit $\lambda=0.5$ erhält man für verschiedene Brände die in Tabelle 5.5 angegebenen Werte für B .

Tabelle 5.5: Werte der Konstanten B in $\text{N/m}^2\text{s}$ (s.Gl. (5.27))

	Brandleistung \dot{Q}_B in kW		
	2.000	20.000	100.000
B_{5000}	80	800	4.000
B_{50000}	8	80	400

Tabelle 5.4: Zeitraum t in Sekunden bis zur Erreichung verschiedener Verhältnisse $\Delta p/\Delta p_{st}$ im 50.000 m³ Brandraum ($m_e = 0.0$)

$\alpha_c A_c$ kW/K	1/C s	Zeitraum t in s für $\Delta p/\Delta p_{st}$ - Werte						
		0.01	0.05	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
46.5	945	9.5	48.5	99.6	337.0	655.0	1137.8	2175.9
93.0	472	4.7	24.2	49.7	168.4	327.2	568.3	1096.8
186.1	236	2.4	12.1	24.9	84.2	163.6	284.1	543.4
372.2	118	1.2	6.1	12.4	42.1	81.8	142.1	271.7

5.3 Berechnung des Druckaufbaus bei Unterdruckhaltung

Im folgenden wird der Fall betrachtet, daß in ein geschlossenes System mit dem Volumen V eine bestimmte Luftmenge durch Unterdruckhaltung einströmt. Infolge eines Brandes wird die Abströmung sofort unterbrochen. Es interessiert nunmehr der zeitliche Verlauf des Unterdruckes im System. Aus Gl. (5.22) erhält man

$$\frac{V}{\chi-1} \frac{dp}{dt} - \dot{m}_z \cdot c_p \cdot T_o = (1-\lambda) \dot{Q}_B \quad (5.22)$$

Darin ist vereinfachend angenommen, daß die Wärmeabgabe an die Umfassungsbauteile einen bestimmten Anteil der durch Brand freigesetzten Energie umfaßt. Die zugeströmte Luftmenge ergibt sich aus:

$$\dot{m}_z = \rho_o \cdot v_z \cdot A_z \quad (5.23)$$

oder

Zur Berechnung der Konstante A ist eine Annahme über die Lüftungsquerschnitte erforderlich. Es wird angenommen, daß die beiden Volumina einem 0.5-fachen Luftwechsel unterliegen, und daß der gesamte Unterdruck von 200 N/m^2 verlustfrei in Geschwindigkeitsenergie umgesetzt wird. Mit diesen beiden Annahmen ergeben sich die Zuströmquerschnitte und die Konstante A gemäß Tabelle 5.6. Man erkennt daran, daß A nicht sehr stark vom System abhängt, wenn man mit konstanten Luftwechselzahlen rechnet.

Tabelle 5.6: Werte der Strömungsquerschnitte A_z und der Konstante A in $\text{N}^{1/2}/\text{ms}$ (s.Gl. (5.26))

V [m ³]	A_z [m ²]	A $\text{N}^{1/2}/\text{ms}$
5000	0.0395	1.50
50000	0.395	1.50

Mit der angenommenen Unterdruckdifferenz von 200 N/m^2 ($\hat{=} 2.0 \text{ m bar}$) zum Zeitpunkt $t = 0$, ergibt sich der erste Term auf der rechten Seite von Gl. (5.28) zu rund $21 \frac{\text{N}}{\text{m}^2\text{s}}$, unabhängig vom Raumvolumen. Unter Einbeziehung der Tabelle 5.5 erhält man die differentielle Druckerhöhung aus Gl. (5.28) zum Zeitpunkt $t = 0$. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 5.7 zusammengestellt.

Tabelle 5.7: Differentielle Druckerhöhung dp/dt zum Zeitpunkt $t = 0$ in N/m^2s

V [m ³]	Brandleistung \dot{Q}_B in kW		
	2.000	20.000	100.000
5000	101	821	4021
50000	29	101	421

Die Tabelle 5.7 zeigt, daß die Druckerhöhung in beiden Systemen sehr rasch erfolgt, wobei bei dem kleineren Volumen in allen drei Beispielen der Anteil aus der Brandleistung an dem Unterdruckabbau überwiegt, wohingegen der Unterdruckabbau im größeren Volumen zunächst wesentlich von der Kaltluftzufuhr mitbestimmt ist.

Bei der Wertung von Tabelle 5.7 ist zu beachten, daß die Brandleistungen zum Zeitpunkt $t = 0$ als schlagartig wirksam angenommen wurden. Es bereitet jedoch keine Schwierigkeiten, Beispiele für wesentlich kleinere Brandleistungen zusammenzustellen. Für $\dot{Q}_B = 0$ ergibt sich z.B. eine minimale differentielle Druckerhöhung zu $21 N/m^2s$. Diese tritt ein, wenn die Abluftklappen schlagartig geschlossen werden. Die Unterdruckhaltung reagiert somit äußerst empfindlich auf Änderungen im thermodynamischen System.

Um den zeitlichen Verlauf der Unterdruckhaltung zu berechnen, muß Gl. (5.25) integriert werden. Als Lösung erhält man:

$$t = - \frac{2 B}{A^2} \ln \frac{1}{B + A \cdot X^{1/2}} - \frac{2}{A} \cdot X^{1/2} + K \quad (5.29)$$

Die Anfangsbedingungen dieser Gleichung sind durch

$$t = 0 : p = p_u \rightarrow X_0 = p_0 - p_u$$

gegeben. Nach Einsetzung der Anfangswerte für K in Gl. (5.29)

erhält man nach einigen Umformungen eine spezielle Lösung der Differentialgleichung:

$$t = \frac{2 B}{A^2} \ln \frac{B + A \cdot X^{1/2}}{B + A \cdot X_0^{1/2}} + \frac{2}{A} (X_0^{1/2} - X^{1/2}) \quad (5.30)$$

Sofern der Zeitpunkt t^* bis zum Zusammenbruch des Unterdruckes ($\Delta p = 0$) interessiert, gilt:

$$t = t^* : p = p_0 \rightarrow X = 0$$

Man erhält somit folgende Beziehung:

$$t^* = \frac{2 B}{A^2} \ln \frac{B}{B + A \cdot X_0^{1/2}} + \frac{2}{A} X_0^{1/2} \quad (5.31)$$

Setzt man wiederum für $X_0 = 200 \text{ N/m}^2$ ein, so ergeben sich mit den Werten der Tabelle 5.6 und 5.7 die in Tabelle 5.8 zusammengestellten Zeiträume für t^* .

Tabelle 5.8: Zeitraum t^* in Sekunden bis zum Zusammenbruch des Unterdrucks von 200 N/m^2

V [m ³]	t* in s		
	2.000 kW	20.000 kW	100.000 kW
5000	2.0	0.2	0.0
50000	9.4	2.0	0.4

In allen Fällen ist der zum Zeitpunkt $t = 0$ angenommene Unterdruck von 200 N/m^2 in weniger als 30 Sekunden zusammengebrochen. Das Rechenergebnis macht deutlich, daß bei den vorgegebenen intensiven Brandverläufen bereits nach wenigen Sekunden in den Brandräumen ein deutlicher Überdruck vorhanden ist.

Dieses Ergebnis wird besonders verständlich, wenn man Gl. (5.31) für den Fall $B = 0$ bzw. $\dot{Q}_B = 0$ auswertet. Aus dem verbleibenden Restglied $(2/A) \cdot X_0^{1/2}$ ergibt sich für t^* ein Zeitraum von 18.6 s, d.h. allein durch die zuströmende Frischluft wird bei geschlossenen Abluftklappen/der Unterdruck in weniger als 30 s praktisch vollkommen abgebaut.

Die hier diskutierten Zeiträume sind offenbar deutlich geringer, als die in der kürzlich veröffentlichten Studie SR 144/1 /25/ genannten Zahlen. Dazu sei folgender Hinweis erlaubt: In der von der TU Braunschweig angestellten Containment-Berechnung wurde angenommen, daß der Brandraum vollkommen geschlossen ist, d.h. die Frischluftzufuhr war als abgestellt und auch die Abluftklappen waren als dicht geschlossen angenommen. Es handelte sich somit um eine Berechnung gemäß Abschnitt 5.2. Eine Betrachtung des Unterdruckes wie hier vorgelegt wurde in SR 144/1 nicht vorgenommen.

5.4 Vereinfachte Druckberechnung

Aus den vorhergehenden Abschnitten wird deutlich, daß die Druckberechnung in geschlossenen Systemen zu vergleichsweise komplizierten Gleichungen führt, die je nach Genauigkeitsgrad und Systembedingungen - z.B. Aufbau eines Überdruckes oder Abbau eines vorhandenen Unterdruckes - zu lösen sind.

Unter Vernachlässigung von Zu- und Abflüssen im System und einer konstanten Energieabgabe λ an die Umfassungsbauteile, läßt sich der Druckanstieg jedoch durch folgende einfache Gleichung bestimmen.

$$\frac{dp}{dt} = \frac{(\chi-1) \cdot (1-\lambda)}{V} \cdot \dot{Q}_B \quad (5.32)$$

Nach der Integration erhält man daraus mit $t = 0 : p = p_p$

$$p - p_0 = \frac{0.2}{V} \cdot \dot{Q}_B \cdot t, \quad (5.33)$$

wobei $\chi = 1.4$ und $\lambda = 0.5$ gesetzt wurden. Diese Formel gilt nur für kurze Zeiträume (z.B. $t < 60$ s), weil der Druck im System linear und unbeschränkt ansteigt. Dies ist nach Abschnitt 5.2 nicht der Fall (vergl. Gl. (5.17)). Um einen ersten Anhalt für den Druckanstieg zu gewinnen, liefert Gl. (5.33) jedoch hinreichend genaue Werte.

Der stationäre Enddruck kann mittels Gl. (5.17) leicht berechnet werden. Sofern die mittlere maximale Gastemperatur im geschlossenen System bekannt ist, kann der Enddruck näherungsweise aus

$$p = \frac{p_0}{m_0 \cdot T_0} \cdot \bar{T}_g \cdot (m_0 + \Delta_R) \quad (5.34)$$

ermittelt werden. Darin sind

- T_0 die Ausgangstemperatur in K,
- \bar{T}_g die mittlere Gastemperatur der miteinander in Verbindung stehenden Räume in K,
- m_0 die Luftmenge im Raum,
- Δ_R die verbrannte Stoffmenge.

Die Gl. (5.34) geht davon aus, daß das System geschlossen ist, d.h. daß keine Zu- bzw. Abflüsse vorhanden sind.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN

Der vorliegende Bericht enthält den Entwurf eines vereinfachten Nachweisverfahrens für den baulichen Brandschutz in KKW. Aufgrund umfangreicher Parameteruntersuchungen mittels Wärmebilanzrechnungen ist es gelungen, praktisch den gesamten Anwendungsbereich deutscher DWR-Anlagen zu erfassen und hinsichtlich Geometrie, Brandlasten und Ventilationsbedingungen abzudecken. Damit ist das ursprünglich gestellte Ziel vollständig erreicht.

Im Rahmen der Studie wurden für die praktische Anwendung Bemessungsdiagramme entwickelt, die für Öl- und Kabelbrände gelten. In den Bemessungsdiagrammen wurden für die entsprechenden geometrischen und lüftungstechnischen Größen bezogene Parameter eingeführt. So konnte z.B. der Einfluß der Raumgeometrie, durch Bezug auf die innere Raumbofläche A_t eliminiert werden. Die theoretischen Parameteruntersuchungen haben ergeben, daß die am Brand jeweils beteiligte Brandherdgröße einen wesentlichen Einfluß auf die Brandwirkungen hat. Dieser Effekt wurde im Gesamtsicherheitskonzept berücksichtigt und ist in die Bemessungshilfen eingearbeitet. Außerdem deckt das Sicherheitskonzept die Streuungen der ventilationsabhängigen Abbrandgeschwindigkeit der Brandlasten und der Feuerwiderstandsdauern der Bauteile im Normbrandversuch ab.

Hinsichtlich der Brandentstehungshäufigkeit und Wirksamkeit der Brandbekämpfungsmaßnahmen, wurden die neuesten Zahlen aus der BMI-Studie /9/ in Rechnung gestellt. Dabei wurde zusätzlich berücksichtigt, daß die in /9/ genannten amerikanischen Daten an die deutschen Verhältnisse angepaßt werden dürfen.

Die beispielhafte Anwendung des neuen Nachweisverfahrens auf typische Raumbereiche eines deutschen KKW mit DWR läßt folgende allgemeine Schlüsse zu:

- Sofern die Brandlasten und Ventilationsverhältnisse bekannt sind, ist die brandschutztechnische Bemessung der Bauteile problemlos durchzuführen.
- Von den untersuchten Raumbereichen zeigen einige eine relativ hohe Brandgefährdung. Die festgestellten Bereiche sind mit denen identisch die bereits in der BMI-Studie /9/ genannt wurden.
- Der Aufwand zur Ermittlung von derartigen Brandgefährdungen bzw. Schwachstellen ist vergleichsweise gering und ohne große Hilfsmittel durchzuführen.
- Für die Optimierung der Brandsicherheit in neuen Anlagen, empfiehlt sich die Durchführung von Vergleichsrechnungen mit unterschiedlichen Kombinationen von z.B. Brandbekämpfungs- und Ventilationsmaßnahmen. Dafür würde sich ein entsprechendes PC-Programm besonders gut eignen.
- Zur objektiven Beurteilung des baulichen Brandschutzes in KKW ist die Forderung nach einer brandschutztechnischen Auslegung zu empfehlen, wobei das vorgelegte Verfahren oder darüber hinausgehende Methoden zur Anwendung kommen sollten. Damit wäre in der Zukunft eine angemessene Berücksichtigung vorhandener (und auch künftig nicht ganz vermeidbarer) Gefahrenschwerpunkte im Brandschutzkonzept nach einheitlichen Gesichtspunkten sichergestellt.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen ist es weiterhin gelungen, die Auswirkungen von Bränden im Hinblick auf die Rauchausbreitung und den Druckaufbau in geschlossenen Systemen abzuschätzen. Dies ist die Voraussetzung für eine bauaufsichtliche Bewertung des Personenschutzes in KKW. Insbesondere die Konzepte zur Rauchfreihaltung von Rettungswegen und zur Unterdruckhaltung erscheinen nunmehr grundsätzlich als objektiv bzw. theoretisch überprüfbar. Aus Zeit- und Kostengründen konnten in diesem Vorhaben dazu jedoch noch keine Parameterstudien durchgeführt und anwendungsreife Bemessungshilfen erstellt werden.

5

7. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Schneider, U.: Regelung des Brandschutzes in KKW auf der Grundlage bauaufsichtlicher Vorschriften. Abschlußbericht, Kassel, März 1984.
- /2/ KTA 2101.2: Brandschutz in KKW, Teil 2: Brandschutz an baulichen Anlagen. Regelentwurfsvorlage, Okt. 1985.
- /3/ Arbeitsgemeinschaft Brandschutz in KKW (ABK): Optimierung von Brandschutzmaßnahmen und Qualitätskontrollen in Kernkraftwerken. BMI-Vorhaben SR 144. Abschlußbericht, Sept. 1981.
- /4/ R.W. Hockenbury, R.C. Gallucci, D. Parker, M.L. Yeater: Occurrence Rates of Fire in Nuclear Power Plants Nuclear Engineering and Design, 66 (1981), 233-240.
- /5/ R.C. Gallucci, R.W. Hockenbury: Fire Incuded Loss of Nuclear Power Plant Safety Functions. Nuclear Eng. Des., Vol. 64, 1981.
- /6/ M. Kazarians, G. Apostolakis: Modeling Rare Events: The Frequencies of Fire in Nuclear Power Plants, presented at Workshop on Low Probability/High-Consequence Risk Analysis, Arlington, Virginia, June 1982.
- /7/ U.S. Department of Energy: Automatic Sprinkler System Performance and Reliability. June 1982.

- /8/ Gallucci, R., R. Hockenbury: Fire-induced Loss of Nuclear Power Plant Safety Functions. Nuclear Engineering and Design 64 (1981) 135-147.
- /9/ GRS, ABK: Optimierung von Brandschutzmaßnahmen und Qualitätskontrollen in KKW. BMI-Vorhaben SR 144/1. Fachband 2, Abschlußbericht, Sept. 1985.
- /10/ Normenausschuß Bauwesen im DIN: Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen. Ausgabe 1981. Berlin: Beuth Verlag, 1981.
- /11/ Hosser, D.: Sicherheitskonzept des Entwurfs DIN 18230. In: Baulicher Brandschutz, Bemessung im Industriebau. Institut für Bautechnik, Berlin, 1979.
- /12/ Hosser, D. und U. Schneider: Sicherheitsanforderungen für brandschutztechnische Nachweise nach der Wärmebilanztheorie. vfdB-Zeitschrift, Heft 1/82 und 2/82.
- /13/ DIN 18230 - Baulicher Brandschutz im Industriebau. Vornorm, Ausgabe 1986).
- /14/ John, R.: Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme zur Verdünnung von Rauchgasen auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Maß. Forschungsberichte Nr. 46 und 50, Forschungsstelle für Brandschutztechnik, TH Karlsruhe, (1982/83).

- /15/ Jin, T.: Visibility through fire smoke. Journal of Fire and Flammability. Vol. 9, S. 135/155, (1978).
- /16/ Jin, T.: Visibility through fire smoke - Part 3 and 4. Rep. of the Fire Res. Inst. of Japan. Ser.No.40, S. 1/10, (1975).
- /17/ Jin, T.: Studies of emotional instability in smoke from fires. Journal of Fire and Flammability. Vol. 12, S. 130/142, (1981).
- /18/ Budnik, E.K.: Mobil home living room fire studies. The role of interior finish. US Dep. of Com., NBSIR 78-1530, NBS Washington, 1978.
- /19/ Ehlert, K.P.: Bericht über Brandversuche in einem viergeschossigen Wohngebäude. Teil II, 5. Int. Brandschutzseminar der VFDB, Bd. I, S. 85/96, (1976).
- /20/ Winkler, H.: Meßverfahren der Rauchdichte und Giftgasemission bei der Verbrennung von Kunststoffen. TÜ 21, Heft 2, S. 79/82, (1980).
- /21/ DFG: Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und biologische Arbeitsstofftoleranzwerte. Mitteilung XIX der Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Verlag Chemie, Weinheim, (1983).
- /22/ Hommel, G.: Handbuch der gefährlichen Güter. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, (1983).

KURZFASSUNG

Der vorliegende Bericht enthält den Entwurf eines vereinfachten Nachweisverfahrens für den baulichen Brandschutz in KKW. Aufgrund umfangreicher Parameteruntersuchungen mittels Wärmebilanzrechnungen ist es gelungen, einen großen Anwendungsbereich deutscher DWR-Anlagen zu erfassen und hinsichtlich Geometrie, Brandlasten und Ventilationsbedingungen abzudecken.

Im Rahmen der Studie wurden für die praktische Anwendung Bemessungsdiagramme entwickelt, die für Öl- und Kabelbrände gelten. In den Bemessungsdiagrammen wurden für die entsprechenden geometrischen und Lüftungstechnischen Größen bezogene Parameter eingeführt.

Die theoretischen Parameteruntersuchungen haben ergeben, daß die am Brand jeweils beteiligte Brandherdgröße einen wesentlichen Einfluß auf die Brandwirkungen hat. Dieser Effekt wurde im Gesamtsicherheitskonzept berücksichtigt und ist in die Bemessungshilfen eingearbeitet. Außerdem deckt das Sicherheitskonzept die Streuungen der ventilationsabhängigen Abbrandgeschwindigkeit der Brandlasten und der Feuerwiderstandsdauern der Bauteile im Normbrandversuch ab. Hinsichtlich der Brandentstehungshäufigkeit und Wirksamkeit der Brandbekämpfungsmaßnahmen, wurden die neuesten Zahlen aus einer vorliegenden BMI-Studie in Rechnung gestellt.

Die beispielhafte Anwendung des neuen Nachweisverfahrens auf typische Raumbereiche eines deutschen KKW mit DWR läßt folgende allgemeine Schlüsse zu:

- Sofern die Brandlasten und Ventilationsverhältnisse bekannt sind, ist die brandschutztechnische Bemessung der Bauteile anhand von Bemessungsdiagrammen durchzuführen.
- Der Aufwand zur Ermittlung von derartigen Brandgefährdungen bzw. Schwachstellen ist vergleichsweise gering und ohne große Hilfsmittel durchzuführen.
- Für die Optimierung der Brandsicherheit in neuen Anlagen, empfiehlt sich die Durchführung von Vergleichsrechnungen mit unterschiedlichen Kombinationen von z.B. Brandbekämpfungs- und Ventilationsmaßnahmen.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen ist es weiterhin gelungen, die Auswirkungen von Bränden im Hinblick auf die Rauchausbreitung und den Druckaufbau in geschlossenen Systemen abzuschätzen. Dies ist eine Voraussetzung für die bauaufsichtliche Bewertung des Personenschutzes in KKW. Insbesondere die Konzepte zur Rauchfreihaltung von Rettungswegen und zur Unterdruckhaltung erscheinen nunmehr grundsätzlich als objektiv bzw. theoretisch überprüfbar.

SUMMARY

The report presents the draft of a simplified method for the prove of structural fire design in NPP. Based on the application of comprehensive heat balance calculations the whole parameters like geometry, fire load, ventilation conditions etc. of a German PWR were covered. A practical design procedure based on diagrams was developed whereby separate diagrams for oil and cable fires were presented.

As probabilistic safety concept was employed as to account for the specific variations of fire parameters as fire load and area, ventilation condition, rate of burning. With respect to the frequency of fire occurances and the impact of fire fighting measures on the spread of fires latest statistic data of a special BMI investigation were used.

The method was successfully applied to some typical areas in a German NPP with a PWR.

RESUMÉE

Le report présent contient le brouillon d'une méthode simplifiée de preuve concernant la protection constructive contre le feu dans des PRN. Investigations étendues avec des calculations de balance de chaleur réussies à faire descriptible le domaine d'application des réacteurs nucléaires allemands d'eau forcée concernant la géométrie, les charges de feu et les conditions de la ventilation.

Pour l'application pratique des diagrammes de calcul, quels sont valables au feu de pétrole et de câbles, ont été développés. Dans ces diagrammes de calcul des paramètres de référence concernant les quantités géométriques et techniques de ventilation ont été présentés. Les recherches théoriques de paramètres indiquent que l'étendue de la source de feu exerce une influence essentielle sur les effets du feu. Cette influence a été considérée dans le brouillon de sûreté totale. En outre le brouillon de sûreté contient les variances de la vitesse de déchet dépendante de la ventilation et les variances des résistances à feu des éléments de construction à l'épreuve de feu standard.

En ce qui concerne la fréquence de naissance du feu et l'efficacité des mesures à lutte contre le feu, les nombres les plus nouveaux dans une recherche présente de BMI (ministère fédéral de l'intérieur) ont été appliqués. La méthode présente a été appliquée avec succès aux locales typiques de la PRN allemande avec des réacteurs nucléaires d'eau forcée.