

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Untersuchungen zur Simulation ausgewählter Brandkenngrößen und deren Wirkung auf die persönliche Schutzausrüstung des Feuerwehrangehörigen

91

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V - "UNTERAUSSCHÜSS FEUERWEHRANGELEGENHEITEN"

Untersuchungen zur Simulation ausgewählter Brandkenngrößen und deren Wirkung auf die persönliche Schutzausrüstung des Feuerwehrangehörigen

Forschungsbericht Nr. 91

für die Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Ulrich Pasch

**Institut der Feuerwehr Sachsen - Anhalt
Heyrothsberge
Juni 1994**

BERICHTS-KENNBLETT

1. BERICHTSNUMMER

91

2. TITEL DES BERICHTES (KURZ)

Untersuchungen zur Simulation ausgewählter
Brandkenngrößen und deren Wirkung auf die
persönliche Schutzausrüstung des Feuerwehr-
angehörigen

3. AUTOR(EN)

Dipl.-Ing. Ulrich Pasch

4. DURCHFÜHRENDE INSTITUTION (NAME/ANSCHRIFT)

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt
Biederitzer Straße 5
D-39175 Heyrothsberge
Direktor: Prof. Dr. rer. nat. habil. Grabski
Branddirektor

5. FÖRDERNDE INSTITUTION/AUFTRAGGEBER

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"

6. ABSCHLUßDATUM

30.06.1994

7. FÖRDER-/ AUFTRAGS-NR.

IMK 92/3

8. SEITENZAHL

51

9. ABBILDUNGEN

29

10. TABELLEN/DIAGRAMME

12/10 (Anlage)

11. LITERATURANGABEN

26

12. KURZFASSUNG

Ableitend aus dem Gesamtumfang der bei Bränden auftretenden Brandkenngrößen, wird die Brandkenngröße "Wärmestrahlung" als relevant für die Einsatzkräfte der F erachtet. Mit der Zielstellung der Prüfung der persönlichen Schutzausrüstung des Feuerwehrangehörigen werden Untersuchungen zur Simulation einer einsatzrelevanten Größenordnung an Wärmestrahlung mittels einer geeigneten technischen Anlage geführt. Am Beispiel einer Propangas-Wärmestrahlerwand wird deren Eignung für den vorgenannten Verwendungszweck, untersetzt durch Berechnungen und Meßergebnisse, untersucht. Die Nutzung der Anlage, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Reproduzierbarkeit ihrer Parameter, wird nachgewiesen.

13. SCHLAGWÖRTER

Brandkenngrößen, Wärmestrahlung,
Schutzausrüstung

14. VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Definition des Brandes	2
3.	Definition der Brandkenngrößen	2
3.1.	Arten der Brandkenngrößen	4
4.	Wärmeübertragungsmöglichkeiten	4
4.1.	Die Wärmeleitung	5
4.2.	Die Wärmeströmung (Konvektion)	6
4.3.	Die Wärmestrahlung	6
4.3.1.	Physikalische Grundlagen	6
4.3.1.1.	Energiebilanz der Strahlung	8
4.3.1.2.	Der Schwarze Strahler	9
4.3.1.3.	Gesetzmäßigkeiten der Strahlung	10
4.3.1.3.1.	Das Wien'sche Verschiebungsgesetz	10
4.3.1.3.2.	Das Kirchhoff'sche Gesetz	11
4.3.1.3.3.	Das Planck'sche Strahlungsgesetz	12
4.3.1.3.4.	Das Stefan - Boltzmann Gesetz	12
4.3.2.	Arten der Strahlung	13
4.3.2.1.	Die Flammenstrahlung	13
4.3.2.1.1.	Berechnungsgrundlagen	14
4.3.2.1.2.	Wärmeübertragung durch Strahlung ...	16
4.3.2.2.	Flammentemperatur und Flammgeometrie	18
4.3.2.2.1.	Flammentemperatur	18
4.3.2.2.2.	Flammgeometrie	20
4.3.2.3.	Die Gasstrahlung	21
4.3.2.4.	Die Festkörperstrahlung	21
5.	Schädigende Wirkungen der Wärme auf den Menschen	24
6.	Auswertung von Originalbränden und Modellbrandversuchen	29
6.1.	Originalbrände	29
6.2.	Modellbrandversuche	29
6.2.1.	Feste Brandstoffe	29
6.2.2.	Flüssige Brandstoffe	32
6.2.2.1.	Versuche mit Pentan, Superkraftstoff ...	32
6.2.2.2.	Weitere Versuche mit Dieselmotorkraftstoff	33
6.2.2.3.	Versuche mit Dieselöl	36
6.2.2.4.	Weitere Versuche	37
6.3.	Festlegungen in Normen	38
6.4.	Zusammenfassung der Ergebnisse	39
7.	Dimensionierung einer Anlage zur reproduzierbaren Simulation der Brandkenngröße "Wärmestrahlung"	41
7.1.	Rechnerische Ermittlung der Wärmestromdichte	41
7.2.	Auswahl des geeigneten Brandmediums	42
7.3.	Berechnung der Wärmestrahlung einer Strahlerwand	43
7.4.	Berechnung der Strahlerwand	43
7.5.	Berechnung der Flächenanteile der Strahlerwand	44
7.6.	Vereinfachte Berechnung des Winkelverhältnisses	45
7.7.	Vereinfachte Berechnung der Intensität ...	46

	7.8. Genaue Berechnung der Intensität der Wärmestrahlung	47
8.	Vermessen der Strahlerwand	50
9.	Ergebnis der Untersuchungen	51
10.	Zusammenfassung	51

1. Einleitung

Brände und die mit ihnen verbundenen Begleiterscheinungen wirken schädigend auf Menschen, Sachwerte und die Umwelt. Ihnen vorzubeugen muß deshalb Grundanliegen der Maßnahmen des Brandschutzes sein, sie im Rahmen von Einsatzhandlungen der Feuerwehr zu bekämpfen, ist ein Erfordernis der Erhaltung menschlichen Lebens und der Schadensminimierung von vom Brand betroffenen Objekten und Einrichtungen. Die Einsatzkräfte der Feuerwehr werden dabei konfrontiert mit all den bei Bränden auftretenden Gefahren, d. h. sie sind permanent den vom Brand ausgehenden Wirkungen, die, qualitativ und quantitativ betrachtet, auch als Brandkenngrößen zu bezeichnen sind, ausgesetzt. Das Garantieren der Einsatzfähigkeit der Einsatzkräfte setzt deren Schutz, in welcher Art auch immer, vor dem vom Brand ausgehenden Gefahrenpotential voraus. Das erforderliche Maß des Schutzes der Einsatzkräfte durch Verwendung einer entsprechenden persönlichen Schutzausrüstung muß sich ableiten aus dem im Brandfall konkret vorliegenden Beanspruchungsparametern bzw. den Brandkenngrößen. Dabei ist davon auszugehen, daß das mit der persönlichen Schutzausrüstung angestrebte Schutzziel nur Verwirklichung findet, wenn sie gegenüber den bei Bränden auftretenden Beanspruchungen über einen einsatzrelevanten Zeitraum resistent ist. Daraus leitet sich das Erfordernis nach grundlegenden Untersuchungen zur Schutzwirkung von Schutzausrüstungen des Feuerwehrangehörigen ab, wobei die perspektivische Zielstellung darin besteht, die Schutzausrüstung dahingehend zu optimieren, daß diese den Träger einerseits zuverlässig schützt, ihn andererseits aber die ihm obliegenden Aufgaben auch weitestgehend belastungsfrei ausüben läßt.

Als ein erster Schritt in diese Richtung soll damit begonnen werden, Grundlagen zur Beurteilung der Schutzwirkung von persönlicher Schutzausrüstung des Feuerwehrangehörigen auf der Basis der Simulation des Einflusses eines realen Brandes auf die Schutzausrüstung zu schaffen.

Die Verwirklichung dieser Zielstellung setzt die Existenz von Prüfverfahren für persönliche Schutzausrüstungen voraus, die vom Anspruch her, die beim Brand auftretenden relevanten Brandkenngrößen qualitativ und quantitativ sowie reproduzierbar nachbilden können. Eine Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der vom Brand auf dessen Umgebung bzw. auf den Schutzanzugträger ausgehenden Wirkungen, die sich, wie oben bereits erwähnt, qualitativ und quantitativ durch die Brandkenngrößen beschreiben lassen. Der Idealfall, die komplex wirkenden und sich gleichzeitig wiederum in gegenseitiger Abhängigkeit befindenden Brandkenngrößen global in die Untersuchungen zur vorgenannten Problematik einzubeziehen, stößt wohl gegenwärtig noch an die Grenzen des Erkenntnisstandes auf diesem Gebiet. Gleichwohl bietet sich als Ausgangspunkt für derartige Überlegungen eine Analyse und Wertung der im einzelnen wirkenden Brandkenngrößen an.

Als eine unter vielen, jedoch als die nachweislich dominierende thermische Brandkenngröße, die im Brandfall auf den Feuerwehrmann einwirkt, kann die *Wärmestrahlung* angesehen werden.

In Hinblick auf die dominierende Relevanz der Wärmestrahlung in bezug auf die thermische Beanspruchung der Einsatzkräfte der Feuerwehr, wird diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit schwerpunktmäßig und vordergründig Beachtung finden.

Bezüglich der an die Schutzkleidung des Feuerwehrangehörigen, z.B. an Wärmestrahlenschutzanzüge, zu stellenden Anforderungen, ist deshalb die Frage von grundsätzlichem Interesse, welche quantitative Größenordnung der Wärmestrahlung denn als repräsentativ für den praktischen Feuerwehreinsatz anzusetzen ist.

Die Kenntnis dieser Aussage gewinnt deshalb besonders an Gewicht, da, als Voraussetzung für die mit dem Forschungsprogramm angestrebte Zielstellung der Simulation von Brandkenngrößen, dieser Ausgangsparameter für die technische Realisierung einer diesbezüglichen Anlage notwendig ist.

Die **Auslegung** einer Simulationsanlage zur reproduzierbaren Darstellung der Brandkenngröße "Wärmestrahlung" unter Beachtung ihres Einsatzes für die Prüfung der persönlichen Schutzausrüstung des Feuerwehrangehörigen ist Zielstellung dieses Forschungsprogramms, die **Anwendung** der Simulationsanlage zum vorgenannten Verwendungszweck wird den vorgegebenen Forschungsinhalten der Forschungsprogramme in den Folgejahren vorbehalten sein.

2. Definition des Brandes

Als Brand oder Schadensfeuer definiert man ein Feuer, das ohne vorbestimmten Herd entstanden ist oder einen solchen verlassen hat und sich aus eigener Kraft auszubreiten vermag. Die beim Brand ablaufende unkontrollierte Verbrennung ist eine rasch ablaufende Redoxreaktion, bei der ein brennbarer Stoff mit einem Oxydationsmittel (meist der Sauerstoff der Luft) reagiert und dabei beträchtliche Energiemengen in Form von Wärme und Licht freisetzt.

Jeder Brand ist an das Vorhandensein von drei Komponenten gebunden:

- Brennstoff
- Sauerstoff
- Wärme (Zündquelle)

/1; 2; 9/

3. Definition der Brandkenngrößen

Brandkenngrößen werden definiert als die meßbaren Begleiterscheinungen, die bei einem Brand auftreten.

"Sie entstehen durch die beim Brand stattfindende stoffliche und energetische Umsetzung der am Verbrennungsprozeß beteiligten Stoffe und dem Oxydationsmittel." /2/

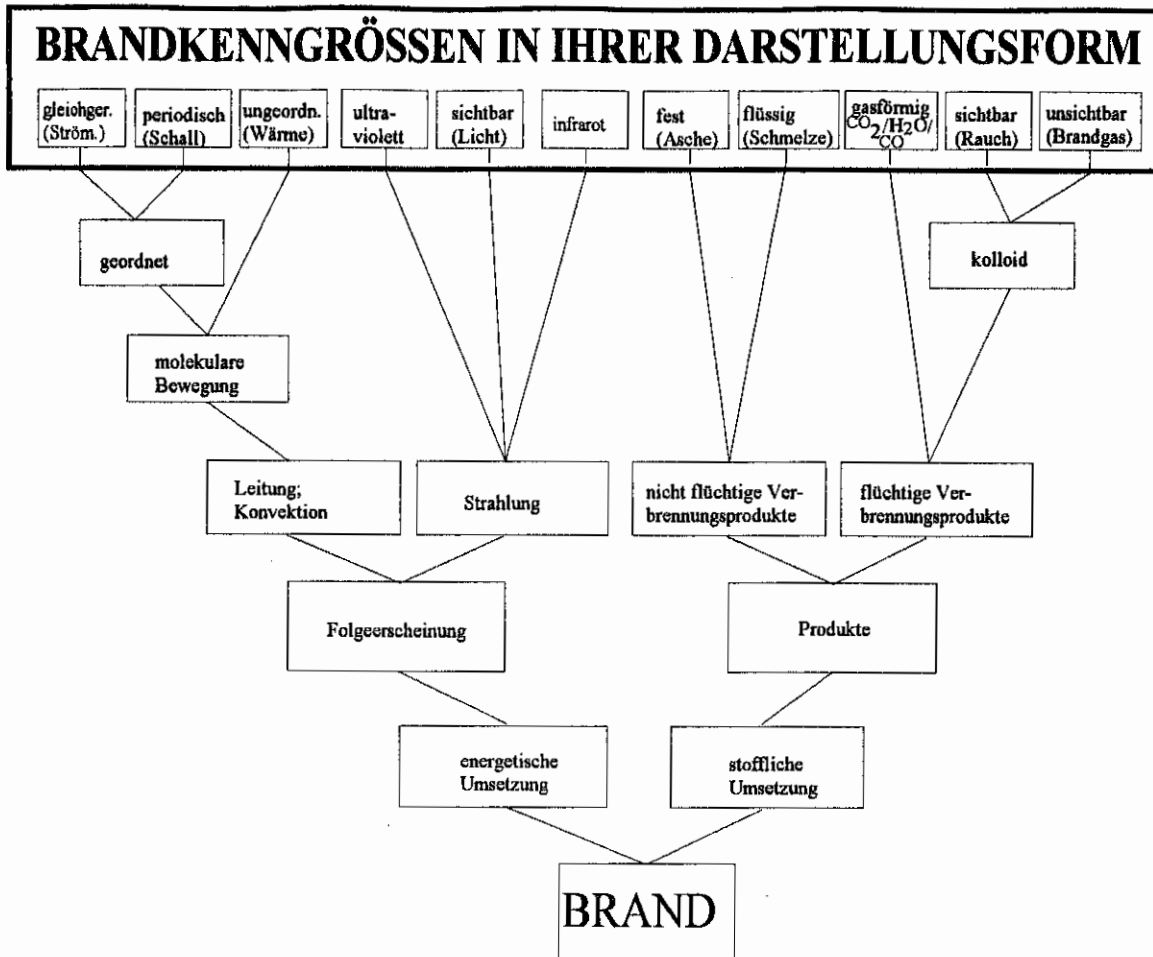


Abbildung 1: Schema Brandkenngrößen in ihrer Darstellungsform/ 8, S.97 /

Bei der **energetischen Umsetzung** wird - als Folge der exothermen Reaktion - Energie in Form von Wärme frei, die durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung an die Umgebung abgegeben wird.

Die **stoffliche Umsetzung** ist durch die Verbrennungsprodukte des Brennmaterials gekennzeichnet, die vom Grundsatz her unterschieden werden nach flüchtigen und nicht flüchtigen Verbrennungsprodukten.

Die energetische und stoffliche Umsetzung sind die zwei sich bei jeder Verbrennung abspielenden Prozesse, woraus die in Abbildung 1 ausgewiesenen Brandkenngrößen in ihrer Darstellungsform resultieren.

Bei der quantitativen Bewertung der Brandkenngrößen spielen vor allem 3 Faktoren eine entscheidende Rolle:

- Brandmaterial (Heizwert, Brennbarkeit, Zerteilungsgrad)
- Zündquelle (Selbstentzündung, Wärmeleitung, Wärmestrahlung, offene Flamme)

- Brandraum (Höhe, aber auch Ausgestaltung). /1; 8/

3.1. Arten der Brandkenngrößen

Als Brandkenngrößen infolge der energetischen Umsetzung können angesehen werden:

a) die Flammentemperatur:

- die jeweilige Temperatur der heißesten Reaktionszone, die sich unter den realen Bedingungen der Verbrennung von Gasen und Dämpfen einstellt,

b) der Wärmestrom des Brandes infolge Strahlung:

- die in der Zeiteinheit freigesetzte Energiemenge in [W] oder [$J \cdot s^{-1}$],

c) die Wärmestromdichte des Brandes infolge Strahlung:

- Wärmemenge, die pro Flächeneinheit in der Zeiteinheit freigesetzt wird [$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$] oder [$W \cdot m^{-2}$].

Als Brandkenngrößen als Folge der stofflichen Umsetzung können angesehen werden:

d) die Rauchdichte:

- bestimmt die Menge der Feststoffteilchen, die in der Volumeneinheit der Rauchgase enthalten sind [$g \cdot m^{-3}$],

e) die Rauchgase:

- bei der Verbrennung von Brennstoffen entstehende Produkte, die trocken oder feucht sein können. Zu den feuchten Rauchgasen gehören: Kohlendioxid, Wasserdampf, Schwefeldioxid, Stickstoff, Stickstoffoxide, Sauerstoff. Bei Sauerstoffmangel gehören auch Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid und Wasserstoff dazu. Bei den trockenen Rauchgasen fehlt der Wasserdampf. /3; 2/

Die unter a) bis c) genannten Brandkenngrößen sollen hier als thermische Brandkenngrößen bezeichnet werden.

4. Wärmeübertragungsmöglichkeiten - grundlegende Betrachtungen

Wärme ist die Energie der ungeordneten Bewegung der Moleküle. Sie breitet sich durch Wärmeleitung, das heißt durch Übergang der Bewegungsenergie von Molekül zu Molekül,

durch Wärmeströmung (Konvektion), also durch Transport mittels eines Wärmeträgers, und durch Wärmestrahlung in Form elektromagnetischer Wellen, aus. /2/

Im wesentlichen hängt die bei einem Brand freiwerdende und übertragene Wärme von der Art des brennenden Mediums und somit von den auftretenden Flammentemperaturen sowie von der Größe des Brandherdes ab. Der Anteil der Übertragungsarten Strahlung und Konvektion am Gesamtübergang wird bestimmt durch die räumliche Zuordnung des brennenden Objektes zu dem dem Brande ausgesetzten Objekt, wobei durch Wind übertragene Flammenausträge zu berücksichtigen sind. Bei geringer Entfernung des brennenden Objektes zu benachbarten Objekten ist der konvektiv übertragene Wärmestromanteil relativ groß, mit zunehmender Entfernung vom brennenden Objekt nimmt er jedoch immer mehr ab, so daß bei entsprechender Entfernung die Wärme nur noch durch Strahlung übertragen wird. /14/ In der Regel kann davon ausgegangen werden, daß ca. 80% der von einem Brand ausgehenden Wärme durch Strahlung auf benachbarte Objekte übertragen wird. Dieser Sachverhalt ist in Hinblick auf die Wärmestrahlungsbelastung auch von Einsatzkräften der Feuerwehr relevant, kann doch in diesem Zusammenhang davon ausgegangen werden, daß, bedingt durch den Strahlrohrabstand zum Brandherd, konvektive Anteile der Wärmeübertragung weitestgehend ausgeschlossen werden können und demzufolge ausschließlich die Strahlungsanteile in bezug auf die thermische Belastung der Einsatzkräfte der Feuerwehr ausschlaggebend sind.

Insofern muß den Wärmeübertragungsarten Wärmeleitung und Konvektion in bezug auf die primäre Untersuchungswürdigkeit eine geringere Bedeutung beigemessen werden, weshalb im folgendem auf die Darstellung dieser Wärmeübertragungsarten nur kurz eingegangen wird.

Dagegen soll in Hinblick auch auf die zu gleicher Problematik in den Folgejahren noch zu lösenden Forschungsaufgaben die Wärmeübertragungsart Wärmestrahlung auch aus theoretischer Sicht umfänglicher dargestellt werden, so daß nach Abschluß aller Arbeiten ein in sich geschlossenes Gesamtwerk zur zu untersuchenden Problematik vorliegt.

4.1. Die Wärmeleitung

Der Vorgang der Wärmeleitung ist eng mit der Bewegung der Teilchen des Stoffes verbunden. Die Wärmeleitung unterscheidet sich von der Konvektion dadurch, daß sie nur zwischen unmittelbar benachbarten Teilchen stattfindet. Sie erfolgt von Orten höherer Temperatur zu Orten niedrigerer Temperatur, so daß nach einiger Zeit der Temperaturunterschied ausgeglichen wird und sich ein Wärmegleichgewicht einstellt. Die Wärmeleitung ist somit immer an Temperaturdifferenzen gebunden. /2; 13/

Probleme der Wärmeleitung sind vordergründig im Rahmen von Untersuchungen zur Schutzwirkung wärmebeaufschlagter Schutzausrüstungen zu beachten.

4.2. Die Wärmeströmung (Konvektion)

Die Wärmeströmung beruht darauf, daß stoffliche Teilchen durch Lageveränderung ihren Wärmehalt transportieren. Sie überlagert sich in Flüssigkeiten und Gasen der reinen Wärmeleitung.

Strömende Medien können beispielsweise ein heißer Flüssigkeitsstrom (z.B. flüssiges Eisen) oder ein heißer Gasstrom (z.B. Brandgase) sein.

Nach [2] werden durch Konvektion bei Feststoffbränden 75 %, bei Benzinbehälterbränden 57 bis 62 % und bei Schnittholzstapelbränden 60 bis 70 % der Gesamtwärme aus der Verbrennungszone abgeführt.

Je nach den für das Auftreten der Strömung verantwortlichen Ursachen unterscheidet man freie und erzwungene Konvektion sowie zwischen laminarem und turbulentem Strömungscharakter. Die freie Konvektion kommt durch die Erwärmung der Medien in der Nähe von heißen Körpern zustande. Die Erwärmung bedingt ihre Ausdehnung und damit die geringere Dichte, so daß es zu Auftriebserscheinungen kommt.

Die erzwungene Strömung wird grundsätzlich durch äußere Einflüsse hervorgerufen. Als Beispiel für äußere Beeinflussung wäre die Be- bzw. Entlüftung von Räumen durch Radiallüfter oder andere Gebläse zu nennen. Als hauptsächliche natürliche Einflußgröße wird der Wind wirksam. [2; 4]

Bei einer laminaren Strömung bewegen sich die Teilchen des Mediums in geraden Bahnen parallel zueinander und zu den Strömungskanalwänden. Diese Strömungsform wird auch als Schichtenströmung bezeichnet. Von turbulenter Strömung wird gesprochen, wenn sich die Teilchen des Mediums ungeordnet, zum Teil senkrecht zur oder entgegen der Strömungsrichtung bewegen. Dadurch kommt es zu einer starken Verwirbelung von Flüssigkeiten bzw. des Gasen. Die Grenze zwischen laminarer und turbulenter Strömung liegt bei der kritischen REYNOLDS-Zahl $Re_{krit}=2320$, was bedeutet, daß oberhalb dieser Grenze im allgemeinen die turbulente Strömungsform vorherrscht.

4.3. Die Wärmestrahlung

4.3.1. Physikalische Grundlagen

Im Gegensatz zur Wärmeleitung und Konvektion, die an ein stoffliches Medium gebunden sind, beruht die Wärmestrahlung auf der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen, die sich auch im Vakuum ausbreiten können. Die Wärmestrahlung ist um so intensiver, je höher die Temperatur des Körpers ist, von dem sie ausgeht. Die Ursache der Wärmestrahlung sind die Schwingungen der Moleküle des strahlenden Körpers. Die Wärmestrahlung reicht vom Infrarot (0,75 bis 30 μm und mehr) bis zum sichtbaren Licht (0,4 bis 0,75 μm), das glühende Körper

aussenden. Sie kann durchgelassen, reflektiert oder absorbiert werden beim Auftreffen auf einen Körper. /2/ In allen Fällen ist

$$R + A + D = 1 , \quad (1)$$

wobei R - der reflektierte Bruchteil (Reflexionsverhältnis),
 A - der absorbierte Bruchteil (Absorptionsverhältnis) und
 D - der durchgelassene Bruchteil (Durchlaßverhältnis) oder Transmission ist. /11/

Bei Absorption wird die Strahlungsleistung vom bestrahlten Körper aufgenommen und umgewandelt, bei Reflexion wird die Strahlung zurückgeworfen, bei Transmission passiert die Strahlung ungehindert den Stoff.

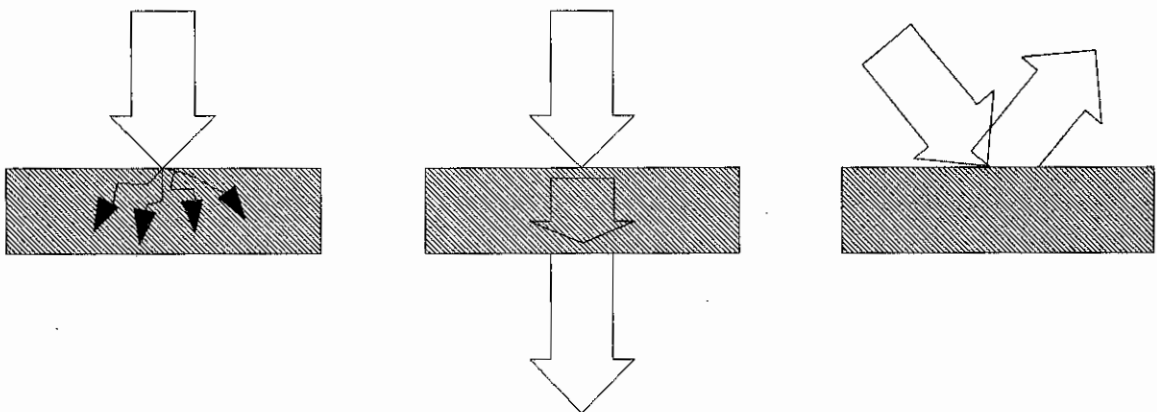


Abbildung 2: Absorption, Transmission und Reflexion /12, S. 487/

Bei der Wärmestrahlung erfolgt eine doppelte Energieumwandlung. Die Wärmeenergie wird zuerst in Strahlungsenergie in Form von elektromagnetischen Wellen umgewandelt, und diese wiederum in Wärmeenergie, wenn die Strahlen auf einen Stoff treffen. /4/

Man nennt einen Körper

- schwarz, wenn er alle auftreffenden Strahlen absorbiert,
- weiß, wenn er alle auftreffenden Strahlen reflektiert,
- grau, wenn er von allen Wellenlängen denselben Bruchteil absorbiert,
- farbig, wenn er bei der Strahlung bestimmte Wellenlängen bevorzugt.

Jeder Körper sendet entsprechend seiner Temperatur eigene Strahlung aus. Den überhaupt möglichen Höchstbetrag an Strahlung liefert ein sogenannter Schwarzer Körper. Jeder andere Körper emittiert weniger als der Schwarze Körper. Das Verhältnis seiner Ausstrahlung zu der des Schwarzen Körpers nennt man Emissionsverhältnis ϵ (auch "Schwärzegrad"); es ist nach dem Kirchhoffschen Gesetz gleich seinem Absorptionsverhältnis A. /11/

Die Wärmestrahlen breiten sich geradlinig nach allen Seiten aus.

Der Anteil der Wärmestrahlung an der gesamten aus der Verbrennungszone abgeführten Wärmemenge beträgt bei Feststoffbränden 25 %, bei Bränden von Schnittholzstapeln etwa 30-40 % und bei Benzinbränden 38- 43 %. /2; 3/

4.3.1.1. Energiebilanz der Strahlung

Ausgangspunkt ist ein strahlungsaktiver Körper, der mit seiner Umgebung im Wärme- und Strahlungsaustausch steht. Der einfallende Strahlungsenergiestrom \dot{F} kann im Körper absorbiert (\dot{A}), durchgelassen bzw. transmittiert (\dot{D}) und reflektiert (\dot{R}) werden, d.h. es ist:

$$\dot{F} = \dot{R} + \dot{A} + \dot{D} \quad (2)$$

Der Körper selbst kann den Wärmestrom \dot{Q} aufnehmen und Strahlung \dot{E} emittieren. Faßt man den vom Körper ausgesendeten Strahlungsenergiestrom \dot{S} durch

$$\dot{S} = \dot{R} + \dot{E} + \dot{D} \quad (3)$$

zusammen, so erhält man für die Energiebilanz

$$\dot{Q} + \dot{F} - \dot{S} = 0 \quad (4)$$

oder

$$\dot{Q} = \dot{E} - \dot{A} \quad (5)$$

\dot{Q} ist dabei der Wärmestrom, der zur Aufrechterhaltung der Temperatur des Strahlers von außen zugeführt werden muß. Er entspricht dem Energiestrom, der durch die Strahlung insgesamt von der Fläche abgeführt wird.

Für das sogenannte Strahlungsgleichgewicht, in dem der Körper genau so viel Strahlungsenergie aus der Umgebung empfängt, wie er aussendet, ist $\dot{F} = \dot{S}$ oder mit Gleichungen (2) und (3):

$$\dot{A} = \dot{E} \quad (6)$$

Im Strahlungsgleichgewicht ist der absorbierte Energiestrom \dot{A} gleich dem emittierten \dot{E} und damit nach Gleichung (5) der vom Körper aufgenommene Wärmestrom $\dot{Q} = 0$.

Der ausgesendete Energiestrom \dot{S} umfaßt mit dem emittierten \dot{E} , reflektierten \dot{R} und transmittierten Energiestrom \dot{D} die gesamte vom Körper ausgesendete Strahlung. Bezieht man Gleichung (2) auf \dot{F} , so erhält man eine wichtige dimensionslose Form der Strahlungsbilanz:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad , \quad (7)$$

wobei man

$$\rho = \frac{\dot{R}}{\dot{F}} \quad (8)$$

als Reflexionsgrad,

$$\alpha = \frac{\dot{A}}{\dot{F}} \quad (9)$$

als Absorptionsgrad und

$$\tau = \frac{\dot{D}}{\dot{F}} \quad (10)$$

als Transmissionsgrad bezeichnet. /5/

4.3.1.2. Der Schwarze Strahler

Beim Schwarzen Strahler werden die einfallenden Strahlen bei der mehrmaligen Reflexion im Hohlraum durch Absorption so weit geschwächt, daß ihre Energie beim Austritt aus der Öffnung praktisch gegen Null geht (siehe Abbildung 3).

Da der Schwarze Strahler die gesamte einfallende Strahlung absorbiert, muß im Strahlungsgleichgewicht nach Gleichung (6) der Strahler den gesamten einfallenden Energiestrom auch emittieren, d.h. es gilt

$$\dot{F} = \dot{A} = \dot{E} \quad (11)$$

Die von einem Schwarzen Strahler emittierte Strahlung nennt man Schwarze Strahlung

$$\dot{E} = \dot{E}_s \quad (12)$$

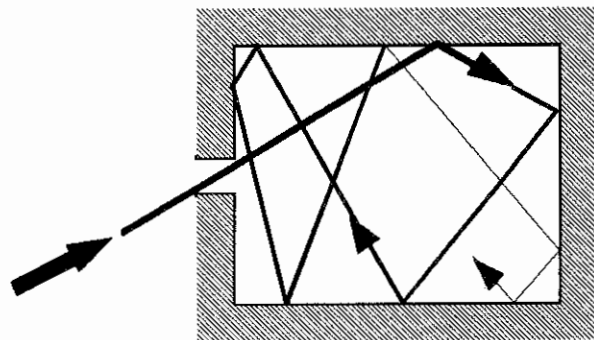


Abbildung 3: Darstellung der Schwarzen Strahlung mit Hilfe eines Hohlraumes

Schwarze Strahlung ist die maximale Energie, die ein Körper emittieren kann, und zwar bei jeder Wellenlänge und in jede Richtung. Sie wird mit dem Index S gekennzeichnet. /5/

4.3.1.3. Gesetzmäßigkeiten der Strahlung

4.3.1.3.1. Das Wien'sche Verschiebungsgesetz

Aus der Darstellung der emittierten spektralen Energiestromdichte des Schwarzen Strahlers ($\hat{e}_{\lambda,S}$) in Abbildung 4 ist ersichtlich, daß die Maxima mit steigender Temperatur zu immer kleineren Wellenlängen verschoben werden. Die Lage der Maxima ist berechenbar, indem in die erste Ableitung nach der Wellenlänge bei $T=\text{const.}$ gleich Null gesetzt wird:

$$\left(\frac{\partial \hat{e}_{\lambda,S}}{\partial \lambda}\right)_T = 0 \quad (13)$$

Mit

$$\hat{e}_{\lambda,S} = \frac{d\dot{E}_S}{d\lambda dA} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (14)$$

erhält man nach der Differentiation

$$\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 - \frac{C_2}{\lambda T} \cdot \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) = 0 \quad (15)$$

als Bestimmungsgleichung für die Lage der Maxima. Die Lösung führt auf das Wien'sche Gesetz:

$$\lambda_{\text{opt}} T = C_3 \quad (16)$$

mit der Wien'schen Konstanten

$$C_3 = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}.$$

Das Wien'sche Gesetz gestattet die Ermittlung der Temperatur des Schwarzen Strahlers bei bekannter Wellenlänge λ für das Maximum der spektralen Energiestromdichte. /5; 18/

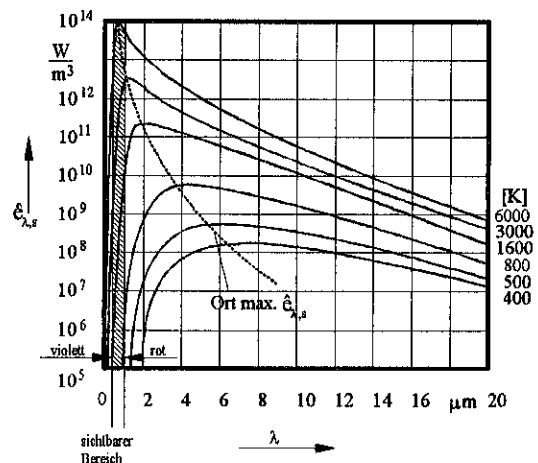


Abbildung 4: Emittierte hemisphärische spektrale Strahlungsenergiestromdichte für den Schwarzen Strahler (Schema) /5, S. 275/

4.3.1.3.2. Das Kirchhoff'sche Gesetz

Zur Beschreibung des Emissionsvermögens eines beliebigen Körpers wird der Gesamtemissionsgrad

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}}{\dot{E}_s} \quad (0 \leq \varepsilon \leq 1) \quad (17)$$

eingeführt. Er ist das Verhältnis der Emission eines beliebigen Strahlers über alle Wellenlängen bezogen auf die Emission eines Schwarzen Strahlers über alle Wellenlängen, wobei der Gesamtemissionsgrad allein eine Funktion der Temperatur des Strahlers, also $\varepsilon = \varepsilon(T)$ ist.

Häufig wird der auf einen Wellenlängenbereich $d\lambda$ bezogene spektrale Emissionsgrad benötigt. Für den spektralen Emissionsgrad gilt

$$\varepsilon_\lambda = \frac{\dot{E}_\lambda}{\dot{E}_{\lambda,s}} \quad (0 \leq \varepsilon_\lambda \leq 1) \quad (18)$$

mit

$$\dot{E}_\lambda = \frac{d\dot{E}}{d\lambda} \quad (19)$$

Bei einem eingeschlossenen Körper wird von dem einfallenden Energiestrom der Energiestrom $\dot{A} = \alpha \cdot \dot{F}$ absorbiert und der Energiestrom $\dot{E} = \varepsilon \cdot \dot{E}_s$ emittiert. Unter der Voraussetzung, daß das System sich im Strahlungsgleichgewicht befindet, erhält man nach Gleichung (6):

$$\alpha \cdot \dot{F} = \varepsilon \cdot \dot{E}_s \quad (20)$$

Besonders einfach wird die Ableitung, wenn vorausgesetzt wird, daß die Umgebung ein Schwarzer Strahler, d.h. $\dot{F} = \dot{E}_s$ ist. Dann gilt $\alpha = \varepsilon$.

Das Kirchhoff'sche Gesetz lautet somit:

Im Falle des Strahlungsgleichgewichts ist der Gesamtemissionsgrad gleich dem Gesamtabsorptionsgrad, $\alpha = \varepsilon$.

Dieses Gesetz gilt für jede Wellenlänge, d.h. der spektrale Absorptionsgrad ist gleich dem spektralen Emissionsgrad: $\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda$. /5/

4.3.1.3.3. Das Planck'sche Strahlungsgesetz

Die Kenntnis der Verteilung der Strahlungsenergie über die Wellenlänge bei unterschiedlichen Temperaturen ist notwendig, da die Strahler immer in bestimmten Wellenlängenbereichen emittieren. Dieses auf die speziellen Wellenlängenbereiche bezogene Emissionsvermögen wird Spektralintensität (spektrale Strahlungsintensität) genannt. Sie ergibt sich nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz für den Schwarzen Strahler zu:

$$I_s = \frac{C_s}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)}, \quad (21)$$

mit

I_s - Spektralintensität in $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$

λ - Wellenlänge in m,

T - Temperatur in K,

C_1, C_2 - spezifische Konstanten auf der Grundlage des Planck'schen

Wirkungsquantums ($h = 6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), der Boltzmann - Konstante ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$

$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) und der Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum: $c_0 = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) als

universelle Naturkonstanten ($C_1 = 0,34 \cdot 10^{-15} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, $C_2 = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$) /16; 18/

4.3.1.3.4. Das Stefan - Boltzmann Gesetz

Die Integration der durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschriebenen spektralen Intensitätsverteilung über den gesamten Wellenlängenbereich liefert den insgesamt von der Fläche des Schwarzen Strahlers in den Halbraum darüber ausgestrahlten Energiestrom (Gesamtstrahlung):

$$E_s = C_s \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (22)$$

E_s - Stromdichte der abgestrahlten Gesamtenergie in $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,

C_s - Strahlungskoeffizient des Schwarzen Körpers in $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
(= $5,67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

T - Temperatur des Strahlers in K

Es zeigt sich, daß die von einem Strahler bestimmter Temperatur je Fläche und Zeit ausgesandte Energie bei proportionaler Temperaturerhöhung des Strahlers wegen der T^4 - Abhängigkeit relativ stark ansteigt. /16/

Die Menge der durch Strahlung übertragenen Wärmeenergie, die die (brennbare) Oberfläche je Zeiteinheit aufnimmt, kann mit Hilfe des modifizierten Stefan- Boltzmann'schen Gesetzes ausdrücken:

$$q = \varepsilon_{1,2} \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi_{1,2} \quad (23)$$

mit

- q - Intensität des Wärmestrahlungsflusses in $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$,
- $\varepsilon_{1,2}$ - Gesamtstrahlungszahl der Oberflächen ($\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$),
- T_1 - Temperatur der strahlenden Fläche in K,
- T_2 - Temperatur der bestrahlten Fläche in K,
- $\varphi_{1,2}$ - Winkelverhältnis,
- C_0 - Strahlungskonstante eines absolut schwarzen Körpers ($= 5,67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).

So ist beispielsweise die Beurteilung der Entzündung brennbaren Materiales durch Bestimmung der Intensität der Wärmestrahlung q der ausstrahlenden Oberfläche und Vergleich mit der kritischen Bestrahlungsintensität q_{krit} der brennbaren Oberfläche möglich. Unter der kritischen Bestrahlungsintensität versteht man den niedrigsten Wert des Wärmeflusses, bei dem sich die brennbare Oberfläche noch entzündet (z.B. bei ungehobelten Platten aus Kiefernholz mit 12 % Feuchtigkeit ist $q_{\text{krit}} = 13600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ bei 12 min Dauer der Bestrahlung). /17; 16/

4.3.2. Arten der Strahlung

4.3.2.1. Die Flammenstrahlung

Als Flamme wird der Strom heißer Gase bezeichnet, der die Zersetzungsprodukte trägt, und zwar Kohlenstoffe, zerteilte Ascheteilchen, Kohle und Flugasche. Diese Stoffe rufen das Leuchten des Gases hervor. [9] Eine leuchtende Flamme entsteht durch örtlichen Sauerstoffmangel. So ist die Flamme eines Bunsenbrenners bei normaler Luftzufuhr nichtleuchtend. Sie wird leuchtend, wenn man die Vermischung des Gases mit Luft behindert, und kann auch rußen, wenn das Gas viel Kohlenwasserstoffe enthält. Das Leuchten der Kohlenwasserstoffflammen tritt allgemein nur ein, wenn kein Sauerstoff unmittelbar anwesend ist und das Gas die Zersetzungstemperatur seiner Kohlenwasserstoffbestandteile überschreitet, ohne daß eine Verbrennung stattfinden kann. Daher ist die Verbrennung bei leuchtenden Flammen verschleppt gegenüber der gleichen nichtleuchtenden Flamme. Die abgeschiedenen, sehr feinen Rußteilchen nehmen Wärme aus der sie umgebenden heißen Gasatmosphäre auf

und strahlen sie an die Umgebung ab. Dadurch kommt eine Steigerung der Wärmeübertragung zustande, die sehr beträchtlich werden kann und unter Umständen das Mehrfache der CO₂- und H₂O- Strahlung ausmachen kann. Näherungsweise kann man solche Flammen als Schwarze Körper ansehen. /10; 11/

Die Strahlungsfähigkeit der Flamme hängt von der Größe und der Menge des enthaltenen Kohlenstoffes und anderer Stoffe, von der Form und den Maßen der Flamme, den Raummaßen, den aerodynamischen Bedingungen der Verbrennung, dem Temperaturregime der Verbrennung usw. ab.

Eine rote Flammenfarbe ist durch die Strahlung sehr kleiner Kohlenstoffteilchen, eine hellblaue Farbe durch chemische Reaktionen (Verbrennung) bedingt. /9/

Die Flammenstrahlung kann also als eine Kombination von Gas- und Festkörperstrahlung angesehen werden, da Kohlenstoff in Form von Ruß den Hauptbestandteil fester Teilchen darstellt und sich in der Diffusionsflamme bei der Zersetzung von brennbaren Gasen und Dämpfen bildet. Größe und Menge der festen Teilchen hängen von der Art des Brennstoffes, der Art der Verbrennung, der Form und Größe der Feuerung, der zugeführten Luftmenge und anderen Faktoren ab.

Die Intensität der Strahlung leuchtender Flammen berechnet sich nach:

$$I_{\text{Strahlung}} = E_0 \cdot \sigma \cdot T_f^4 \quad (24)$$

mit

$I_{\text{Strahlung}}$ - Intensität der Flammenstrahlung in $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$

E_0 - Schwärzungsgrad der Flamme

σ - Stefan- Boltzmann- Konstante ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

T_f - Flammentemperatur in K

/6; 9/

4.3.2.1.1. Berechnungsgrundlagen

1. Nach dem Zylinder- Flammen- Strahlungsmodell

Bei der Berechnung des von der Flamme durch Strahlung auf die in der Umgebung befindlichen Objekte übertragenen Wärmestroms wird von folgenden Voraussetzungen ausgegangen:

- Die Berechnung erfolgt für den Zeitabschnitt des Brandes, in dem der Brand mit einer annähernd konstanten Abbrandgeschwindigkeit abläuft.
- Eine Absorption und Streuung der von der Flamme emittierten Wärmestrahlung in der zwischen der Flamme und den gefährdeten Objekten befindlichen Atmosphäre durch Wasserdampf, Kohlendioxid und Staub tritt nicht auf.
- Bei der Flamme handelt es sich wegen der unvollständigen Verbrennung, wie sie im allgemeinen bei Bränden auftritt, um eine leuchtende Flamme. Derartige Flammen kann man näherungsweise bei Flammendicken größer als 1 m als Schwarze bzw. Graue Körper mit einem Emissionsvermögen zwischen 0,9 und 1 ansehen.
- Die Temperatur und das Emissionsvermögen der Flamme haben an jedem Ort der Flamme den gleichen Wert und ändern sich während des Brandablaufs nicht.

Mit diesen Voraussetzungen kann die Bestrahlungsstärke (\dot{q}_s), die an einem beliebig in der Umgebung des brennenden Objektes befindlichen Flächenelementes auftritt, mit dem Stefan-Boltzmann'schen Gesetz wie folgt berechnet werden:

$$\dot{q}_s = \varphi \cdot \dot{Q}_f \quad (25)$$

mit

$$\dot{Q}_f = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_f^4 \quad (26)$$

\dot{q}_s	-	Bestrahlungsstärke in $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$,
\dot{Q}_f	-	Wärmestromdichte der von der Flamme maximal emittierten Strahlung in $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$,
T_f	-	Flammentemperatur in K
ε	-	Emissionsvermögen,
σ	-	Stefan- Boltzmann- Konstante ($5,67 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).

φ ist das Winkelverhältnis und gibt den Bruchteil der von einem strahlenden Körper ausgesandten Wärme wieder, der auf ein in der Umgebung befindliches Flächenelement auftrifft. /15/

2. Nach dem Ballen - Strahlungsmodell

Beim Ballen - Strahlungsmodell setzt sich der von der Flamme durch Strahlung emittierte Wärmestrom aus dem von den Flammenballen, sogenannten hot spots, die mit einem Flächenanteil a_{hs} an der gesamten Flammenfläche auftreten, emittierten Wärmestrom und dem von den Rußballen emittierten Wärmestrom zusammen. Damit ergibt sich in erster Annäherung für die Wärmestromdichte der von der Flamme maximal emittierten Strahlung folgende Beziehung /19/:

$$\dot{Q}_f = a_{hs} \cdot \dot{Q}_{hs} + (1 - a_{hs}) \cdot \dot{Q}_r \quad (27)$$

Hierin ist:

- \dot{Q}_f - die Wärmestromdichte der von der Flamme maximal emittierten Strahlung in $W \cdot cm^{-2}$,
- \dot{Q}_{hs} - die Wärmestromdichte der von den Flammenballen (hot spots) emittierten Strahlung in $W \cdot cm^{-2}$,
- \dot{Q}_r - die Wärmestromdichte der von den Rußballen emittierten Strahlung in $W \cdot cm^{-2}$,
- a_{hs} - der Flächenanteil, der in der Flamme auftretenden Flammenballen (hot spots) an der gesamten Flammenfläche.

4.3.2.1.2. Wärmeübertragung durch Strahlung bei einem Brand eines Flüssiggas-Lagertanks

Für die Berechnung der Bestrahlungsstärke, die an einem Flächenelement eines benachbarten Objektes auftritt, wird vorausgesetzt, daß die Flamme völlig auf der Tanköffnung aufsitzt und die Form eines Zylinders hat, dessen Durchmesser gleich dem Tankdurchmesser und dessen Höhe gleich der Flammenlänge ist. Da das Winkelverhältnis nur von dem die strahlende Fläche einschließenden Winkel und nicht von der Form dieser Fläche abhängt, kann die Oberfläche des Flammenzylinders durch eine Rechteckfläche im Abstand a' ersetzt werden (siehe Abbildung 5).

Der auf den Tankdurchmesser bezogene äquivalente Abstand a' und die auf den Tankdurchmesser bezogene äquivalente Flammenhalbbreite b können entsprechend den in Abbildung 5 wiedergegebenen geometrischen Verhältnissen nach folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$\frac{a'}{d} = \frac{2 \cdot \left[\left(\frac{r}{d} \right)^2 + \frac{r}{d} \right]}{2 \cdot \left(\frac{r}{d} \right) + 1}, \quad (28)$$

$$\frac{b}{d} = \frac{\sqrt{\left(\frac{r}{d} \right)^2 + \frac{r}{d}}}{2 \cdot \left(\frac{r}{d} \right) + 1} \quad (29)$$

Der Verlauf der Bestrahlungsstärke, der an einem parallel zur Flammenachse in halber Flammenhöhe bzw. in Höhe der Flammenwurzel liegenden Flächenelement auftritt, ist in Abbildung 6 über dem auf den Tankdurchmesser d bezogenen Abstand r für die beiden bezogenen Flammenlängen $l_F/d = 2$ und $l_F/d = 3$ aufgetragen. Wie man sieht, treten die höchsten

Bestrahlungsstärken in halber Flammenhöhe ($c/d = 0,5$) auf. In Höhe der Flammenwurzel sind sie bis zu 50 % geringer, wobei diese Differenz von 50 % in unmittelbarer Nähe der Flamme über ca. 20 - 30 % bei $r/d = 2$ mit zunehmender Entfernung abnimmt.

Abbildung 6 läßt weiterhin erkennen, daß die Werte der Bestrahlungsstärke für $l_F/d = 2$ z.B. bei $r/d = 1$ nur um 5 - 15 % geringer sind als die Werte, die sich für $l_F/d = 3$ ergeben.

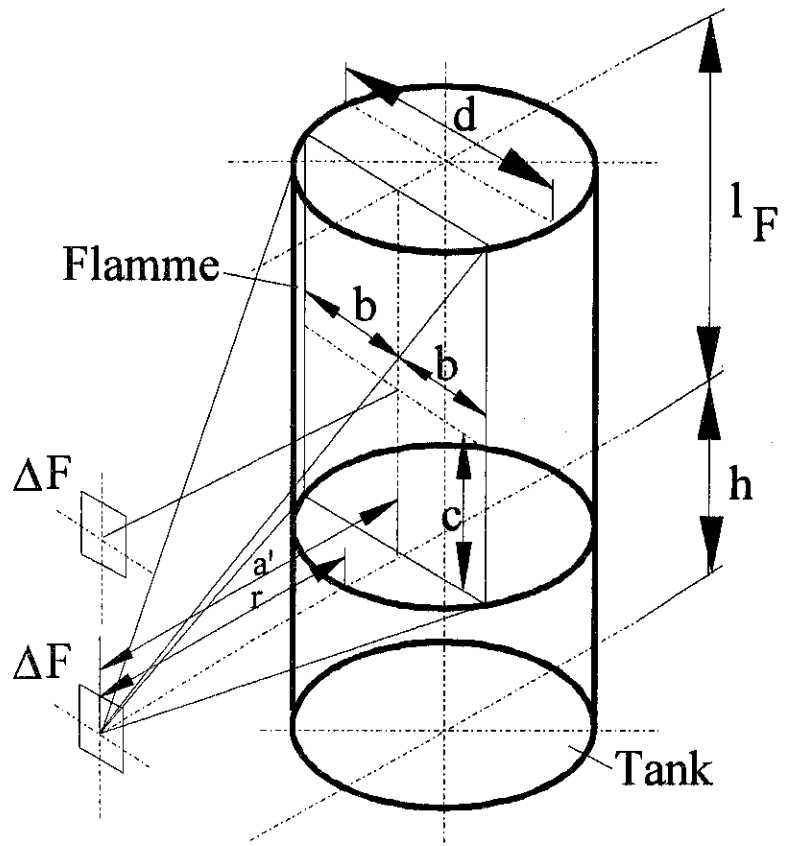


Abbildung 5: Substitution des Flammenzylinders durch eine Rechteckfläche zur Bestimmung der Winkelverhältnisse [15, S. 26]

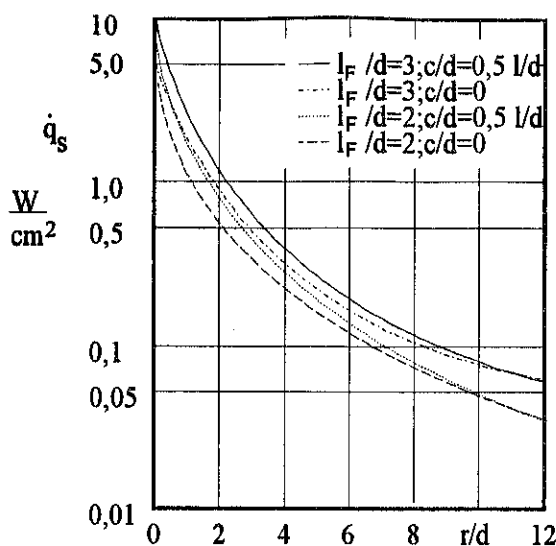


Abbildung 6: Verlauf der Bestrahlungsstärke in halber Flammenhöhe bzw. in Höhe der Flammenwurzel in Abhängigkeit von dem auf den Tankdurchmesser bezogenen Abstand für zwei auf den Tankdurchmesser bezogene Flammenlängen

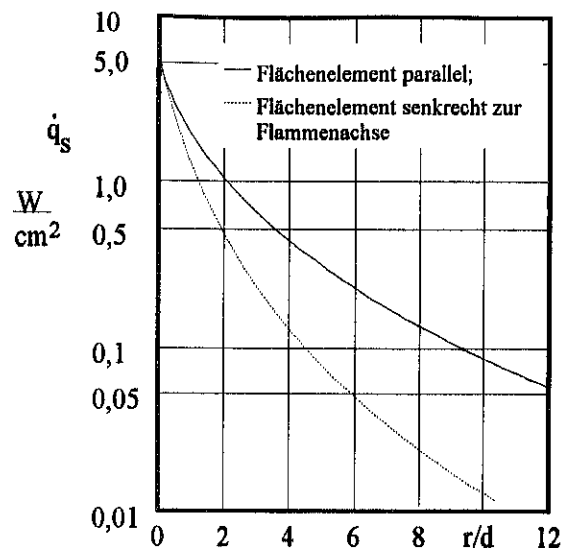


Abbildung 7: Verlauf der Bestrahlungsstärke in Höhe der Flammenwurzel an einem Flächenelement parallel bzw. senkrecht zur Flammenachse in Abhängigkeit von dem auf den Tankdurchmesser bezogenen Abstand für $l_F/d = 3$

Welchen Einfluß die Lage des bestrahlten Flächenelementes auf die Größe der Bestrahlungsstärke hat, zeigt Abbildung 7. Dort ist der Verlauf der Bestrahlungsstärke, die sowohl an einem parallel zur Flammenachse als auch an einem senkrecht zur Flammenachse in Höhe der Flammenwurzel liegenden Flächenelement auftritt, über dem auf den Tankdurchmesser d bezogenen Abstand a für $l_F/d = 3$ dargestellt. So ist bereits bei $r/d = 2$ die Bestrahlungsstärke, die an dem senkrecht zur Flammenachse liegenden Flächenelement herrscht, auf weniger als die Hälfte des Wertes der Bestrahlungsstärke abgefallen, der an dem parallel zur Flammenachse liegenden Flächenelement auftritt. /15/

4.3.2.2. Flammentemperatur und Flammgeometrie

4.3.2.2.1. Flammentemperatur

In der technischen Verbrennungslehre wird die Flammentemperatur auch als Verbrennungstemperatur, bei Bränden als Brandtemperatur bezeichnet. Dies ist die jeweilige Temperatur der heißesten Reaktionszone, die sich unter realen Bedingungen bei Verbrennung von Gasen und Dämpfen einstellt. Die Flammentemperatur ist z.B. von der Zusammensetzung des brennbaren Systems abhängig und erreicht Minimalwerte an der unteren und oberen Explosionsgrenze. Etwas oberhalb der stöchiometrischen Konzentration (Konzentration des brennbaren Stoffes bei vollständigem Umsatz) wird der Maximalwert des jeweiligen Systems erreicht. Zwischen

500 und 5000 °C können die Flammentemperaturen variieren. Bei Stoffen mit geringem Heizwert und bei großem Luftüberschuß entstehen niedrige Flammentemperaturen. Hohe Flammentemperaturen entstehen dagegen bei Verwendung eines stöchiometrischen Gemisches aus Brenngasen mit hohem Heizwert und unverdünntem Sauerstoff in vorgemischtem Zustand. Die Flammentemperatur steigt bei Bränden mit der Branddauer und erreicht häufig 1000 bis 1100 °C, teilweise auch 1300 °C. Dabei handelt es sich um real gemessene Werte, die man nicht exakt berechnen kann. /2/

Tabelle 1: Einige Beispiele gemessener Flammentemperaturen

brennbarer Stoff	Flammentemperatur in °C
Acetylen	2100
Schwefelkohlenstoff	2200
Wasserstoff	2000
Knallgas	2700
verflüssigte Gase	1500
Leuchtgas	900...1350
Benzin	1200
Dieselmotorkraftstoff	1100
Alkohol	1200
Gummi	1200
Stearinkerze	650...950

/7, S. 76/]

In vielen Untersuchungen wurden Flammentemperaturen bestimmt. Dabei stellte sich heraus, daß die maximale Höhe der Flammentemperatur stark davon abhängt, an welcher Stelle der Flamme gemessen wird. Die Temperaturen liegen zwischen 2400 °C und 200 °C. Ferner sind die maximalen Temperaturen der Flamme von der Art des brennenden Mediums bzw. bei Gemischen von deren Zusammensetzung abhängig.

Bei Butan- und Hexanflammen ist z.B. eine mittlere maximale Temperatur von 1400 °C gemessen worden, wobei zwischen der Butan- und der Hexanflamme unterschiedliche Temperaturverteilungen vorlagen. Die Temperaturverteilung der Flamme ist von den entstehenden Pyrolyseprodukten des Brandmediums und vom Abstand von der Reaktionszone abhängig.

Eine mittlere Flammentemperatur ist durch die großen Temperaturschwankungsbreiten innerhalb der Flamme nur schwer zu bestimmen, zumal diese mittlere Temperatur noch von der

bezogenen Flammenfläche und der Strahlungszahl der Flamme, die stark durch die Rußabdeckung beeinflusst wird, abhängt.

4.3.2.2.2. Flammengeometrie

Die strahlende Flammenfläche ist bestimmt durch die Brandherdbreite b bzw. den Brandherddurchmesser d und die Flammenlänge l_F , wobei sich die Flammenlänge als zeitlicher integraler Mittelwert ergibt. Durch die Brandherdbreite ist wiederum die Flammenbreite bestimmt. Bezieht man bei der Bestimmung der Flammenlänge den relativ kalten Anteil der Rußsäule der Flamme mit ein, kann auch die Flammenintensität (Strahlungsleistung der Flamme bei Abstand $x = 0$) als integraler Mittelwert über die Zeit und die Fläche nur einen niedrigen Wert annehmen. Berücksichtigt man die sogenannten hot spots (Flammenballen zwischen Rußballen, die sich über den ständig strahlenden Flammteilen oberhalb des Brandherdes bilden), ist die für Berechnungen zu berücksichtigende Flammenintensität geringer zu wählen als wenn man nur die ständig sichtbare Flammenlänge unterhalb der Abdeckung durch Ruß zur Bestimmung der Flammenfläche wählt.

Die Flammenlänge wird also bei weniger rußender Flamme größer. Bei Brandherddurchmessern $> 1\text{ m}$ unterliegt die Flammenlänge einer periodischen Pulsation durch zyklisches Einsaugen von Luft. An dieser Stelle ist der Anfang für starke Rußbildung festzustellen und wird als Grenze für die Flammenlänge gewählt.

Die Flammenlänge wird mitbestimmt durch das Brandmedium. Auswertungen aus Videoaufzeichnungen ergaben, je nach Brandmedium, bezogene mittlere Flammenlängen zwischen $l_F/d = 0,5$ und $l_F/d = 1,3$ (Tabelle 2).

Tabelle 2: Flammenlängen aus Videoaufzeichnungen:

Brandmedium	Fläche des Brandherdes in m^2	mittlere Flammenlänge h in m	bezogene mittlere Flammenlänge l_F/d
Dieselmotorenöl	(8 m \varnothing) 50	3,0	0,37
Dieselmotorenöl	(25 m \varnothing) 500	5,0	0,2
Dieselmotorenöl	(25 m \varnothing) 500 *	12,5	0,5
Superbenzin	(8 m \varnothing) 50	5,3	0,66
Superbenzin	(25 m \varnothing) 500 *	15,0	0,6
Superbenzin	(25 m \varnothing) 500	10,0	0,5
Pentan	(8 m \varnothing) 50 *	5,0	0,63
Pentan	(8 m \varnothing) 50	4,7	0,59
Pentan	(8 m \varnothing) 50	7,8	0,98
Pentan	(8 m \varnothing) 50 *	10,4	1,3
Pentan	(25 m \varnothing) 500 *	23,0	0,9

* - mit Windeinfluß; alle anderen Flammenlängen gemessen ohne wesentlichen Windeinfluß

Für die Bemessung der Flammenlänge wurde der Mittelwert aus kleinster und größter Flamme unterhalb der entstehenden Rußballen gewählt. Dies ist deshalb sinnvoll, weil - wie schon oben dargelegt - dieser Teil der sichtbaren Flamme den weitaus größten Anteil an der strahlenden Flamme bildet und ohne großen Aufwand bestimmt werden kann. /14/

4.3.2.3. Die Gasstrahlung

Auch Gase können Wärmestrahlung absorbieren und strahlen daher nach dem Kirchhoffschen Gesetz ihrerseits auch Wärme aus. Die elementaren Gase, z.B. O₂, N₂, H₂, Luft, Edelgase sind bei Temperaturen bis 3000 °C durchlässig für Wärmestrahlen. Andere technisch wichtige Gase und Dämpfe, wie H₂O, CO₂, CO, SO₂, HCl, sind dagegen wirksame Strahler, die aber nur in gewissen Wellenlängenbereichen (sog. "Banden") absorbieren und emittieren (selektive Strahler).

Auch Kohlenwasserstoffe haben eine ganz beträchtliche Eigenstrahlung und Absorption, und zwar um so mehr, je mehr Atome das Molekül hat. Für die Absorption bei festen Körpern genügt schon eine Schichtdicke von wenigen Hundertstel Millimeter und man spricht deshalb von der Strahlung fester Oberflächen. Bei Gasen werden Absorption und Emission erst bei Schichtdicken von der Größenordnung einiger Zentimeter merklich, so daß erst ein Gaskörper strahlt. /11/

4.3.2.4. Die Festkörperstrahlung

Wird von zwei Körpern Strahlung emittiert, die jeweils auf den anderen Körper auftrifft und dort reflektiert, teilweise absorbiert und in Wärme umgewandelt wird, so geht ein Wärmestrom vom Körper mit höherer Oberflächentemperatur zum Körper mit niedrigerer Oberflächentemperatur über. Für zwei parallele Oberflächen von gleicher Größe und kleinem Abstand im Verhältnis zur Oberfläche beträgt der durch Strahlung von Körper 1 auf Körper 2 übertragene Wärmestrom

$$Q_{1,2} = C_{1,2} \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (30)$$

Dabei bedeutet C_{1,2} die Strahlungsaustauschzahl, die sich aus dem Emissionsgrad der Körper und der Stefan- Boltzmann- Konstante C_s ergibt:

$$C_{1,2} = \frac{C_s}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (31)$$

In der Abbildung 8 seien A_1 und A_2 zwei beliebig im Raum liegende, gleich große Flächen mit den Temperaturen T_1 und T_2 und den Emissionsverhältnissen ε_1 und ε_2 . Dann ist die zwischen A_1 und A_2 ausgetauschte Wärme:

$$Q_{12} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\pi} \cdot C_s \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \iint_{A_1, A_2} \frac{\cos\beta_1 \cos\beta_2}{s^2} dA_1 dA_2 \quad (32)$$

Hierin sind β_1 und β_2 die Winkel zwischen der Verbindungslinie von der Länge s zwischen zwei Elementen dA_1 und dA_2 beider Oberflächen und deren Flächennormalen.

Stehen sich zwei Flächen unterschiedlicher Größe gegenüber, so kann man nicht davon ausgehen, daß die gesamte von der einen Oberfläche emittierte Strahlung auf die zweite Oberfläche auftrifft. Der zwischen den Flächen A_1 und A_2 übertragene Wärmestrom ergibt sich bei Vernachlässigung von gegenseitigen Reflexionen, wenn die bestrahlte Oberfläche mit Index 1 und die strahlende Oberfläche mit Index 2 bezeichnet wird, zu:

$$\dot{Q}_{21} = \varphi_{21} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot A_2 \cdot C_s \cdot T_2^4 - \varphi_{12} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot A_1 \cdot C_s \cdot T_1^4, \quad (33)$$

wobei φ_{12} bzw. φ_{21} die Raumwinkel (Einstrahlzahlen) bedeuten. Mit dem Raumwinkel φ kann man den Wärmefluß zwischen zwei Oberflächen in beliebiger räumlicher Lage zueinander berechnen. Die Beziehung zwischen Raumwinkel der Flamme und Raumwinkel der bestrahlten Oberfläche wird durch Gleichung (34) ausgedrückt:

$$A_1 \cdot \varphi_{12} = A_2 \cdot \varphi_{21} \quad (34)$$

Mit Hilfe von Gleichung (34) läßt sich Gleichung (33) wie folgt auflösen:

$$Q_{21} = \varphi_{12} \cdot A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot C_s \cdot (T_2^4 - T_1^4) \quad (35)$$

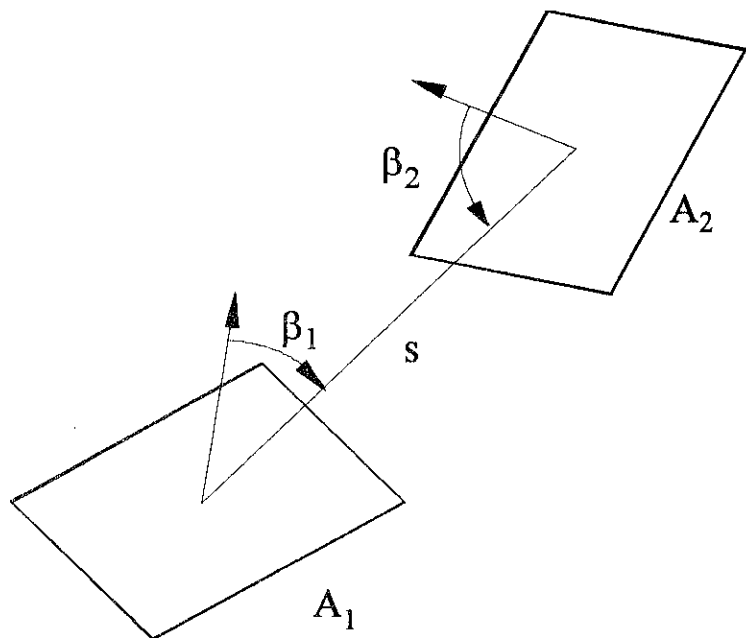


Abbildung 8: Strahlungsaustausch zwischen zwei Flächen /11, S. A 21/

Setzt man $\varepsilon_1 \approx 1$, folgt

$$\frac{Q_{21}}{A_1} = \varphi_{12} \cdot \varepsilon_2 \cdot C_S \cdot (T_2^4 - T_1^4) \quad (36)$$

Mit

$$\frac{Q_{21}}{A_1} = q_1 \quad (37)$$

und

$$\varepsilon_2 \cdot C_S \cdot (T_2^4 - T_1^4) = q_2 \quad (38)$$

folgt

$$q_1 = \varphi_{12} \cdot q_2 \quad (39)$$

Gleichung (39) dokumentiert, daß die gemessene Strahlungswärme (q_1) eine Funktion des Raumwinkels der Flamme (φ_{12}) und deren Strahlungsintensität (q_2) ist. [14]

Bei zwei parallelen, sich gegenüberliegenden Rechteckflächen (siehe Abbildung 9), ergibt sich φ_{12} zu :

$$\varphi_{12} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{x}{\sqrt{x^2 + r^2}} \cdot \arctan \frac{y}{\sqrt{x^2 + r^2}} + \frac{y}{\sqrt{y^2 + r^2}} \cdot \arctan \frac{x}{\sqrt{y^2 + r^2}} \right] \quad (40)$$

oder

$$\varphi_{1,2} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{B}{\sqrt{1+B^2}} \cdot \arctan \frac{C}{\sqrt{1+B^2}} + \frac{C}{\sqrt{1+C^2}} \cdot \arctan \frac{B}{\sqrt{1+C^2}} \right] \quad (41)$$

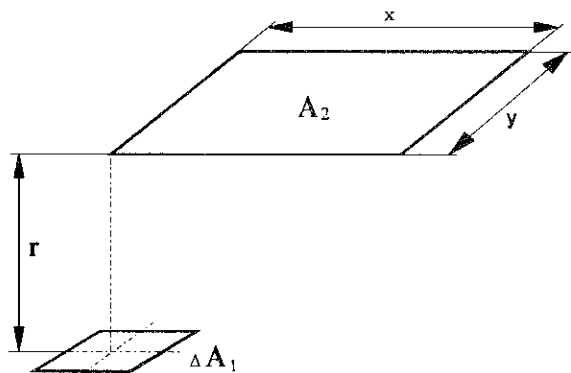


Abbildung 9: Parallele Rechteckfläche mit einer Ecke in der Mittelsenkrechten des Flächenelementes

Die sich unter den vorgenannten Voraussetzungen ergebenden Einstrahlzahlen φ_{12} sind in Abbildung 10 dargestellt.

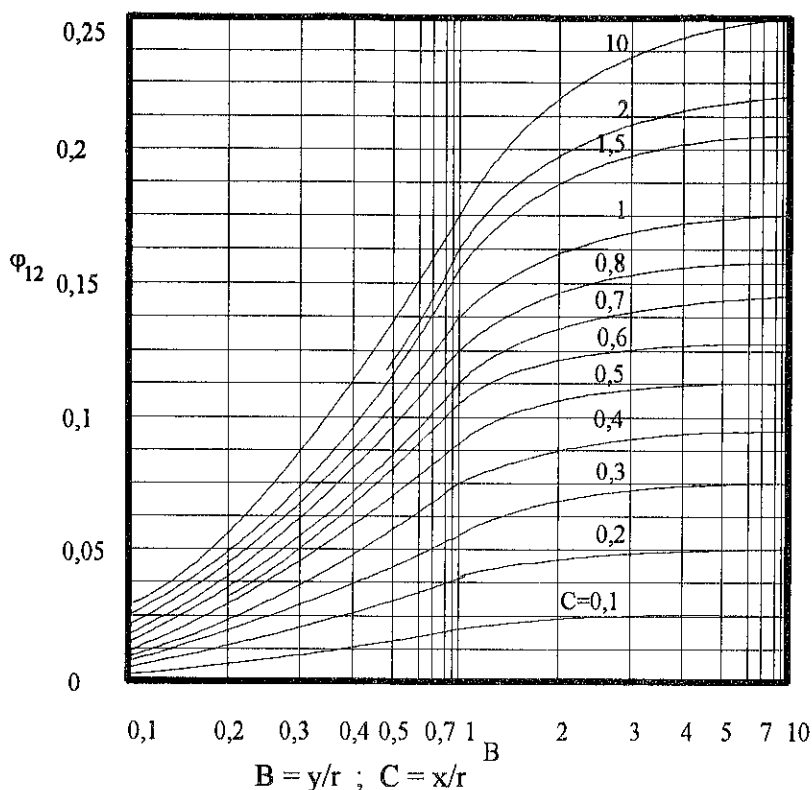


Abbildung 10: Einstrahlzahl φ_{12} bei Strahlung eines Flächenelementes auf eine parallele Rechteckfläche in Abhängigkeit von B und C /11, S. Kb 3/

5. Schädigende Wirkungen der Wärme auf den Menschen

Als generelle Möglichkeiten für die Wärmeübertragung von der Umgebung auf den Menschen kommen ebenso wie bei anderen Prozessen die Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung in Betracht. Die übertragenen Wärmemengen nehmen mit steigender Temperaturdifferenz zwischen der Haut und der Umgebung zu und hängen von dem Wärmeübertragungskoeffizienten sowie von der Wärmeleitfähigkeit im Zusammenwirken mit der Verdunstung der Hautfeuchtigkeit ab.

Im Bereich höherer Temperaturen ist der durch Strahlung übertragene Wärmeanteil größer als der konvektive Betrag. Das bedeutet, daß von einer auf 400 °C erwärmten nahen Wand eine größere thermische Belastung für den Menschen ausgeht als von einer 400 °C heißen unbewegten Luft. Andererseits ist eine bewegte Heißluft gefährlicher als eine ruhende Luftschicht gleicher Temperatur, weil die den Wärmeübergang hemmende laminare Grenzschicht über der Haut bzw. Kleidung dann weniger dick ist.

Der Mensch wird um so stärker erwärmt, je schneller er sich entgegen der Strömungsrichtung des erwärmten Gases bewegt und je schneller dieses strömt. Ein relativ kurzfristiger Aufenthalt eines bekleideten Menschen im Bereich großer Wärmestrahlungsintensitäten oder Lufttemperaturen ist um so weniger gefährlich, je höher der Wärmedurchlaßwiderstand der

gesamten Kleidungshülle ist. Das trifft für eine locker getragene mehrschichtige Kleidung zu, die über die entsprechenden Luftschichten mit großer Isolationswirkung verfügt. Auch bei in Brand geratener Kleidung wirkt sich das Vorhandensein mehrerer Kleidungsschichten aus nichtschmelzenden Textilien günstig aus, da der Wärmeübergang zur Haut dadurch für eine gewisse Zeit verzögert wird. Bezüglich des Aufenthaltes des Menschen in heißer Luft gilt allgemein, daß die kurzfristige Einwirkung unbewegter Luft mit einer Temperatur $> 300\text{ °C}$ und bewegter Luft mit einer Temperatur $> 100\text{ °C}$ Hautverbrennungen hervorruft. In diesen kritischen Situationen ist die Geschwindigkeit der Wärmezufuhr zur Haut größer als diejenige des Wärmetransportes durch den Blutstrom in der Haut. Das führt zum Wärmestau, in dessen Folge die Hauttemperatur auf einen physiologisch schädlichen Wert ansteigt. Hautschäden im Sinne von Verbrennungen zweiten Grades treten auf, wenn die Haut $\approx 20\text{ s}$ lang einer Temperatur von 55 °C bzw. für 1 s eine Temperatur von 70 °C hat.

WIRKUNG VON KONTAKTTEMPERATUREN AUF DIE MENSCHLICHE HAUT		
HAUTTEMPERATUR IN °C	OBERFLÄCHLICHE VERBRENNUNGEN	TIEFE VERBRENNUNGEN
50	nach 2 min	nach 4 min
55	15 s	25 s
60	3 s	5 s
65	1 s	2 s
70	0,4 s	1 s

Abbildung 11: Wirkung von Kontakttemperaturen auf die menschliche Haut

OBERFLÄCHENTEMPERATUREN DES GEWEBEPAKETES WSSA - EINSATZBEKLEIDUNG DER FEUERWEHR - UNTERWÄSCHE BEI EINER WÄRMESTROMDICHTHE VON $1,4\text{ W / qcm}$		
ZEIT IN s	TEMPERATUR DER GEWEBEPAKETOBERFLÄCHE IN °C	
	AUSSEN	INNEN
0	48,0	25,8
30	82,2	27,2
60	156,6	28,4
90	172,6	30,2
120	177,0	32,4
150	180,2	36,0
180	183,4	37,8
210	186,0	39,2
240	188,4	42,4
270	187,8	45,0

Abbildung 12: Durch Wärmestrahlung bedingte Temperaturen an Gewebepaket

Tabelle 3: Wärmeempfindungsstufen der unbedeckten menschlichen Haut entsprechend der Strahlungsintensität /16, S. 15/ (ohne besondere Berücksichtigung des Zeitfaktors):

Intensität der einfallenden Wärmestrahlung in $W \cdot cm^{-2}$	Empfindungen auf der Haut
0,006...0,01	spürbare Wärme
0,02...0,06	deutliche Wärmeempfindung
0,1...0,23	Heißempfindung
0,3...0,5	Schmerzempfindung

Tabelle 4: Richtwerte für Einsatzzeiten der Kräfte der Feuerwehr in Abhängigkeit von der Intensität der einfallenden Wärmestrahlung und der Art des Körperschutzes: /16, S. 16/

Schutzart	Maximale Wärmestromdichte in $W \cdot cm^{-2}$	zulässige Einsatzzeit ohne Körperschädigung in min
normale Einsatzkleidung	0,15...0,2 0,3	langzeitig ≤ 5
Spezialkleidung	0,6	langzeitig
Spezialkleidung mit darüberliegendem Wärmestrahlschutzanzug	1,0	≤ 5
Spezialbekleidung, während der Brandbekämpfung mit Wasser kontinuierlich berieselt	2,0	≤ 5

In unmittelbarer Nähe der Flammen liegen bei größeren Bränden oft so große Wärmestrahlungsintensitäten vor, daß ein wirksamer Schutz innerhalb der geforderten Zeitspanne nur durch Reflexion großer Teile der auf den Menschen auftreffenden Wärmestrahlung erreicht wird. Wärmestrahlen können dadurch nicht mehr im Sinne der Energieumwandlung (elektromagnetische Energie in Wärmeenergie) zur Erwärmung des Körpers genutzt werden. Diese Funktion wird am besten von spiegelnden Metalloberflächen mit geringem Emissionsverhältnis und hohem Reflexionsgrad erfüllt. Solche Metalloberflächen zeigen auch noch bei Verschmutzung (z.B. Ruß) eine relativ große Reflexionsfähigkeit. Dafür ist Aluminiumfolie auf entsprechender Kleidung als Wärmestrahlschutz besonders gut geeignet, da sie nur 10 % der einfallenden Wärmestrahlung absorbiert.

Aber auch derart ausgestattete Wärmestrahenschutzanzüge können im Bereich entsprechender Bestrahlungsstärken eine Erwärmung der Einsatzkraft auf Dauer nicht verhindern, da sich der absorbierte Strahlungsanteil auf der Aluminiumoberfläche in Wärmeenergie umwandelt und durch Wärmeleitung auf den menschlichen Körper übertragen wird.

Der erforderliche Abstand von einem Brandherd für ungeschützte Einsatzkräfte kann überschlägig berechnet werden mit:

$$S = 1,6 \cdot h_F \quad (42)$$

S - Abstand der Einsatzkräfte zur äußeren Begrenzung der Flammen in m,

h_F - Höhe der Flammenfackel in m.

[16]

Tabelle 5: Minimale Abstände wärmestrahlungsexponierter Einsatzkräfte zum Brandort in Abhängigkeit von der Flammentemperatur und der Schutzvariante: /16, S. 23/

Flammentemperatur in °C	Wärmestromdichte in $W \cdot cm^{-2}$ in Abhängigkeit von der Entfernung in m			
	0	2	5	10
500	0,65*	0,16**	0,025*	0,0065
600	1,0	0,25 ⁺⁺	0,04	0,01
700	1,7	0,42	0,068	0,017
800	2,5	0,62 ⁺	0,1	0,025*
900	3,5	0,875	0,14	0,034
1000	4,8	1,2	0,19**	0,048
1100	6,5	1,42	0,26	0,065
1200	8,7	2,18	0,35 ⁺⁺	0,087
1300	12	3	0,48	0,12
1400	15	3,75	0,6	0,15
1500	18	4,5	0,72 ⁺	0,18**
2000	49	12,2	1,95	0,49 ⁺
3000	210	52,5	8,4	2,1

Anmerkungen: maximal zulässige Wärmestromdichten für die jeweilige Schutzvariante innerhalb des gegebenen Abstandsbereiches:

* ungeschützt, $q_{zul} = 0,03 W \cdot cm^{-2}$

** Asbestanzüge, $q_{zul} = 0,2 W \cdot cm^{-2}$

+ aluminiumbeschichtete Anzüge, $q_{zul} = 0,8 W \cdot cm^{-2}$

++ Anzüge aus leonischem Gewebe, $q_{zul} = 0,4 W \cdot cm^{-2}$

Tabelle 6: Wirkung der Flammenstrahlung

Wärmestromdichte in kW·m ⁻²	Wirkung
3,88	Beginn der Zersetzung organischer Stoffe
4,44	Erträglichkeitsgrenze für den Menschen
9,44	totale Zersetzung der meisten organischen Stoffe
12,74	Zündung der meisten organischen Stoffe

/9, S.56/

Tabelle 7: Verbrennungsgrad bei thermischen Schädigungen der Haut entsprechend der Tiefe des betroffenen Bereiches: /16, S.28/

Verbrennungsgrad	thermisch verletzte Bereiche	Erscheinungsbild bzw. Besonderheiten	Heilungsmerkmale
1	Schädigung der Epidermis (Oberhaut)	Rötung und Schwellung durch reaktives Ödem	Regeneration ohne Narbe
2	Abheben der Epidermis von der Kutis (Lederhaut)	Blasenbildung (infolge Füllung der Spalträume mit Gewebsflüssigkeit)	bei nichtinfektiösem Verlauf vollständige Regeneration ohne Narbe
3a	Partialdestruktion des Epithels (schichtenartige Zellverbände in der Haut)	ein bestimmter Anteil von unzerstörtem Epithel verbleibt in Form einer Neststruktur	bei nichtinfektiösem Verlauf noch vollständige narbenlose Heilung, wenn Regeneration von Epithelnestern ausgeht; bei Infektion Heilung mit Gewebedefekten; auch bei vollständiger Regeneration Hypalgesie- Erscheinung (verringerte Schmerzempfindlichkeit der neuen Haut)
3b	Totalzerstörung der epithelialen Hautanteile	keine verbleibenden Epithelnester, Haut sieht grau-schwarz (Verbrennung) oder weiß verkocht (Verbrühungen) aus	keine Regeneration infolge fehlender Epithelnester; Heilung mit Narben, Schrumpfungstendenz, Gefahr der Kontraktur (permanente starke Verkürzung von Weichteilen und dadurch Zwangsstellung von Gelenken)

4	Schädigung tieferer Gewebsformationen bis hin zu Muskeln und Sehnen	vollständige Verkohlung oberer Schichten und partielle Verkohlung tiefer liegender Gewebe	bei entsprechendem Schädigungsausmaß operative Entfernung kleinerer oder größerer Bezirke bis hin zu beispielsweise Amputation an Extremitäten; Hautpartien zeigen nach Abheilung Analgesie (Aufhebung der Schmerzempfindlichkeit)
---	---	---	--

6. Auswertung von Originalbränden und Modellbrandversuchen

6.1. Originalbrände

In Auswertung der Literatur konnte festgestellt werden, daß bei Originalbränden kaum Strahlungsintensitäten gemessen wurden. Deshalb sind hier nur zwei Beispiele für Originalbrände aufgeführt.

Bei Großbränden auf Holzlagerplätzen wurden Wärmestromdichten in 10 ... 15 m Entfernung vom Brand gemessen, die zwischen $0,42$ und $0,56 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ lagen. Ungeschützt kann ein Mensch diese nur rund 10 ... 20 s ertragen. In 30 ... 40 m Entfernung lagen die Werte noch bei $0,056$... $0,105 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Bei einer brennenden Scheune mit einer Flammenfrontbreite von 2 m und einer Flammenhöhe von 3,50 m wurde in 3 m Entfernung eine Wärmestromdichte von rund $0,35 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ gemessen. /16/

6.2. Modellbrandversuche

6.2.1. Feste Brandstoffe

Die folgende Tabelle zeigt in Auswertung von Brandversuchen mit festen Brandstoffen Flammentemperaturen und Wärmestromdichten beim Abbrand verschiedener brennbarer Materialien, die unter Freiraumbedingungen ermittelt wurden.:

Tabelle 8: Flammentemperaturen beim Abbrand verschiedener Materialien und sich daraus ergebende rechnerische radiative Wärmestromdichten:

Material	Lagerungs- dichte [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$]	Höchst- temperatur des Brandes T_1 in [K]	radiative Wärmestromdichte [$\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$]		
			$\epsilon = 1,0$	$\epsilon = 0,8$	$\epsilon = 0,6$
lockere Baumwolle	50	580	0,6	0,5	0,4
lockeres Papier	25	640	1,0	0,8	0,6
Kiefernholz	100	1270	14,8	11,8	8,9
Plexiglas	25	1380	20,6	16,5	12,3
Steinkohle / Briketts	-	1470	26,5	21,2	15,9
Polystyrol	25	1370	20,0	16,0	12,0
Polystyrol	50	1620	39,0	31,2	23,1

/22, S. 55/

Aus Tabelle 8 ist ersichtlich, daß mit zunehmender Temperatur und Emissionszahl auch die Wärmestromdichte zunimmt. Aus der Flammentemperatur von 1270 K bei Kiefernholz resultiert eine Wärmestromdichte von $8,9 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ bei $\epsilon = 0,6$. Bei gleichbleibender Flammentemperatur, aber bei einem ϵ von 0,8, steigt die Wärmestromdichte auf $11,8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, bei $\epsilon = 1$ liegt die Wärmestromdichte bei $14,8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Außerdem ist festzustellen, daß die Flammentemperatur von der Lagerungsdichte (Brandlast) des brennbaren Materials abhängig ist. Damit wird der Fakt, daß die Flammentemperatur eine Funktion der Brandlast ist, bestätigt. Dies ist sehr gut an Polystyrol nachzuvollziehen:

- Bei einer Lagerungsdichte von $25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ und einer Flammentemperatur von 1370 K liegt die Wärmestromdichte bei $12 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (bei $\epsilon = 0,6$), $16 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (bei $\epsilon = 0,8$) und bei $20 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (bei $\epsilon = 1$).
- Bei den gleichen Emissionszahlen wie oben erwähnt, jedoch bei einer Flammentemperatur von 1620 K und einer Lagerungsdichte von $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ liegen die Wärmestromdichten bei $23,4 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, $31,2 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ bzw. $39 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. /22/

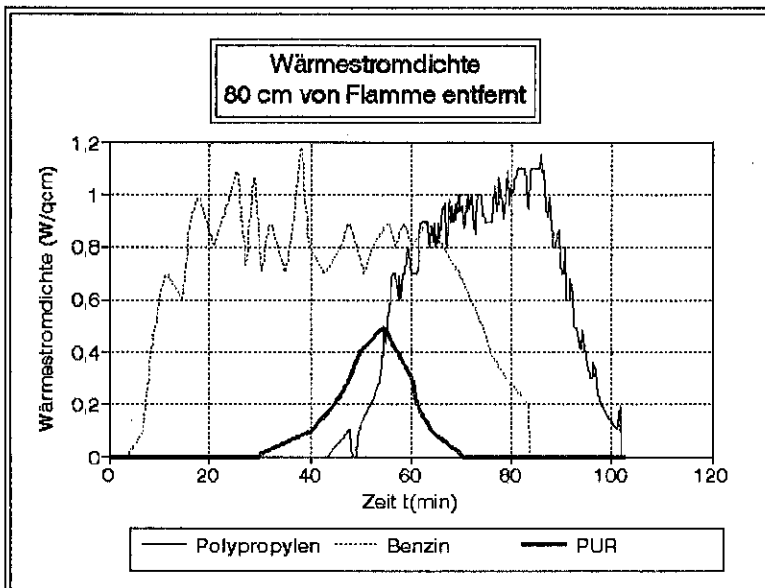
Dies ist damit zu erklären, daß bei mehr gelagertem Material pro m^2 auch mehr Materie verbrennen kann und demzufolge mehr Energie freigesetzt wird.

Unter Zugrundelegung von $\epsilon = 0,8$ und einer Flammentemperatur bis maximal $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ wäre für die nachfolgenden Betrachtungen ein Bereich für die Wärmestromdichte von $0,5 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ bis ca. $11 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ anzusetzen (das entspricht den Werten für Baumwolle, Papier, Kiefernholz in Tabelle 8).

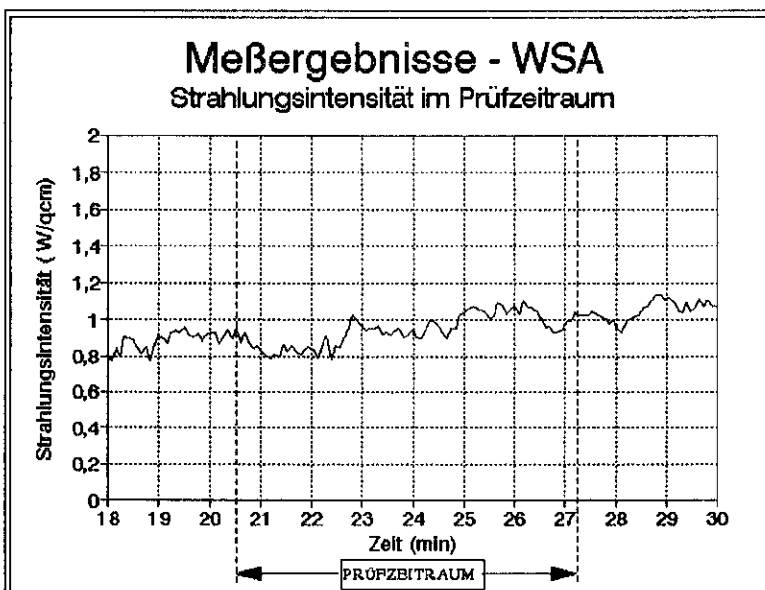
RICHTER /25/ berichtet über verschiedene Experimente mit brennenden Holzstößen und anderen Teststrukturen. In einem dieser Experimente wurde ein Holzstoß (lose Pfähle) mit einer Fläche von 2,5 m x 2,5 m x 2 m, ungefähr 1000 kg umfassend, in 30 min abgebrannt. Beobachtet wurde eine Flamme von 3 m Höhe mit einer Flammentemperatur von 860°C und eine gesamte Brandfläche von ungefähr 15 m², einschließlich der Gesamtfläche des Holzstoßes und der Flamme.

Der Maximalwert der Strahlung der brennenden Fläche wird mit 3,48 W·cm⁻² angegeben, wobei in diesem Zusammenhang die Aussage getroffen wird, daß 10 % der durch den Abbrand des Holzes erzeugten Wärmemenge Strahlungsanteile sind.

Beim Abbrand eines Gummireifenstapels (Gesamtmasse 11520 kg) auf einer Fläche von 50 m² wurden Flammenhöhen von etwa 3 m beobachtet und Flammentemperaturen von 1200...1300°C gemessen. Die von der brennenden Fläche ausgehende Strahlungsintensität betrug bis zu 7 W·cm⁻². /25/



Im Rahmen von Untersuchungen zu verschiedenen Brandstoffen am Institut der Feuerwehr wurden für Polypropylen und Polyurethan die aus nebenstehender **Abbildung 13** ersichtlichen Wärmestromdichten gemessen. Zum Vergleich wird die Wärmestromdichte von Benzin unter gleichen Meßbedingungen angegeben.



Bei am Institut der Feuerwehr durchgeführten Prüfungen von Wärmestrahlschutzanzügen nach den Richtlinien der SBG Hamburg wurde mittels eines Normbrandholzstapels (1600x500x400 mm - 62,5 kg) eine Flammenwand (T=700°C) von 1600x1500 mm erzeugt. Nebenstehende **Abbildung 14** zeigt: Max. Strahlungsint. 1,15 W·cm⁻² bei Abstand 1,7 m.

6.2.2. Flüssige Brandstoffe

6.2.2.1. Versuche mit Pentan, Superkraftstoff und Dieselkraftstoff

Es wurden Versuche an Brandflächen bis zu 500 m² mit 14 Brandstoffen durchgeführt, bei denen unter anderem auch der Wärmestrom gemessen wurde.

Für die Versuche wurden kreisrunde Wannen mit Durchmessern von 0,5; 2,5 ; 8 und 25 m , das sind Brandflächen von 0,2; 5; 50 bzw. 500 m² , ausgewählt. Die Wände der 0,2 m²- und 5 m²- Wanne waren wassergekühlt. Die 50 m²- und 500 m²- Brandwannen waren mit Ton ausgekleidete, in das Erdreich eingelassene Vertiefungen.

In die Wannen wurden die brennbaren Flüssigkeiten Pentan (Siedepunkt: 36°C), Superkraftstoff (Siedebereich 25-215°C) und Dieselkraftstoff (Siedebereich 200-360 °C) in einer Schichtdicke von 25 mm auf ein Wasserpolster gegeben.

Die vorgenannten brennbaren Flüssigkeiten wurden aufgrund ihres Siede- und Dampfdruckbereiches als repräsentativ und typisch für folgende häufig im Mineralölbereich

Versuchsaufbau:

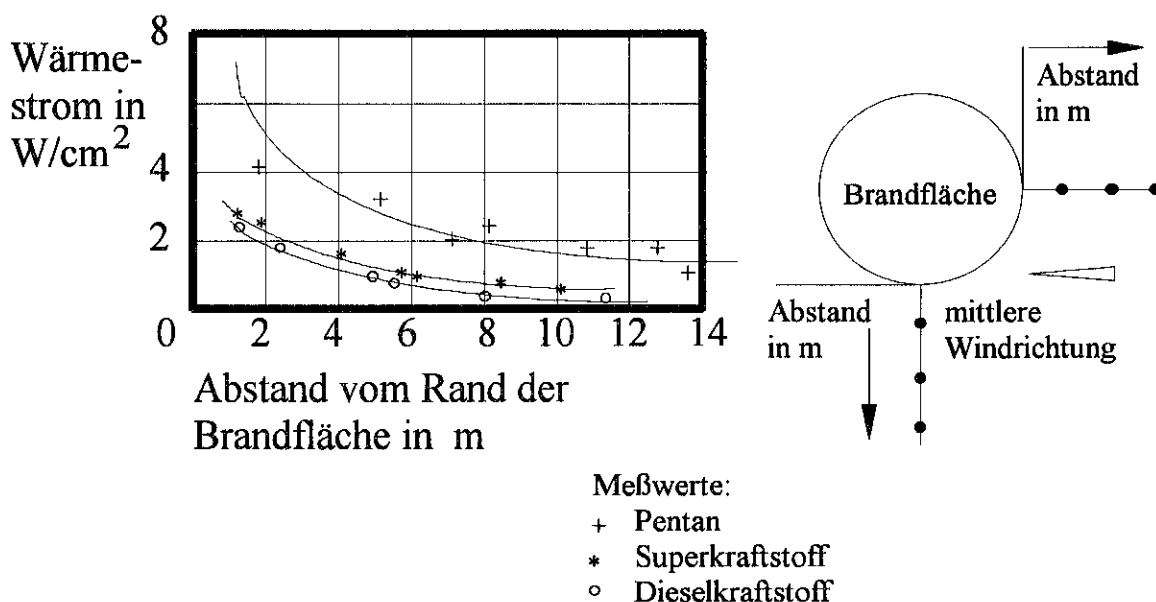


Abbildung 15: Verlauf des Wärmestromes in Abhängigkeit vom Abstand /21, S. 141/

gelagerte Produkte angesehen: Pentan, Hexan, Heptan, Dodecan, Tetradecan, Heptan/ Dodecan Gemisch, Superkraftstoff, Kerosin, Dieselkraftstoff, Rohöl, Pentan/Heptan (75:25 und 50:50) Gemisch, M 15 (Superkraftstoff + 15 % Methanol) sowie Mischkraftstoff (JP₄ und Flugbenzin).

Am Beispiel der 500 m²- Brandfläche wurden die ermittelten Ergebnisse der Wärmestromdichte in Abbildung 11 dargestellt.

Für Pentan wurde im Brandflächenzentrum (bei 1 m Abstand) der höchste Wert für den Wärmestrom gemessen, nämlich ca. 7 W·cm⁻². Nach 4 m betrug er nur noch 3,5 W·cm⁻², nach 8 m 2 W·cm⁻², nach 10 m ca. 1,8 W·cm⁻².

Die Meßwerte und somit auch die ermittelten Kurven für Super- und Dieseldieselkraftstoff lagen sehr dicht beieinander. In 1 m Abstand lag der Wärmestrom für Superkraftstoff bei ca. 3 W·cm⁻². Auch dieser Wert nahm mit zunehmendem Abstand ab. So lag er nach 2 m bei 2,3 W·cm⁻², nach 6 m bei 0,8 W·cm⁻² und nach 10 m bei ca. 0,5 W·cm⁻². Für Dieseldieselkraftstoff sind die Werte, wie vorher erwähnt, denen von Superkraftstoff ähnlich. Der Wärmestrom nach 1 m Abstand betrug ca. 2,5 W·cm⁻², nach 2 m hatte er einen Wert von 1,8 W·cm⁻², nach 6 m ca. 0,6 W·cm⁻² und nach 10 m 0,3 W·cm⁻². Nach 10 m wurde also bei beiden, Super- und Dieseldieselkraftstoff, die Wärmestromdichte erreicht, die der Schmerzschwelle des Menschen entspricht./21/

Unter den gewählten Versuchsbedingungen ergeben sich folgende Eckwerte für die Intensität der Wärmestromdichte:

Brandmedium	Strahlungsintensität [W·cm ⁻²] bei einem Abstand von	
	1m	10 m
Pentan	7	1,8
Superkraftstoff	3	0,5
Dieseldieselkraftstoff	2,5	0,3

Tabelle 9: Wärmestrahlungsintensitäten in 1 m und 10 m Abstand für Pentan, Superkraftstoff und Dieseldieselkraftstoff

6.2.2.2. Weitere Versuche mit Dieseldieselkraftstoff

Mit dem Brandmedium Dieseldieselkraftstoff wurden weitere Untersuchungen zur Ermittlung der Strahlungswärme in Abhängigkeit vom Abstand durchgeführt. Die Abmessungen der rechteckigen Brandwannen für den Dieseldieselkraftstoff betragen 2,5 · 1,1 m², 2,5 · 2,5 m², 5 · 1,1 m² und 5 · 5 m². Die Ergebnisse der Versuche mit Dieseldieselkraftstoff sind in den folgenden Abbildungen 16-19 dargestellt:

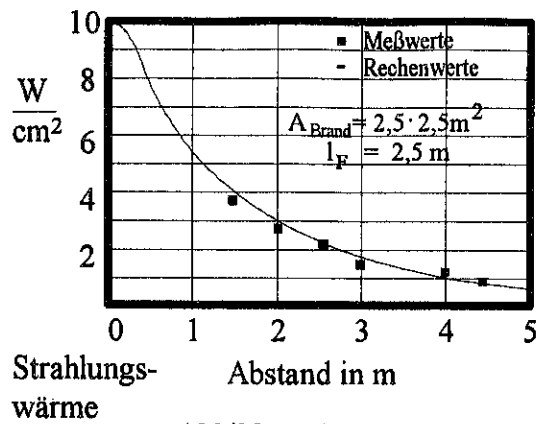


Abbildung 16

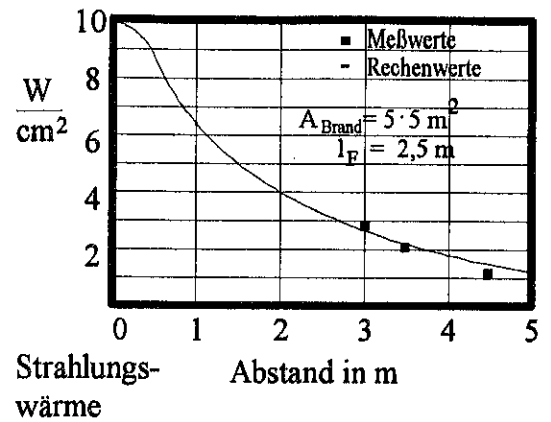


Abbildung 17

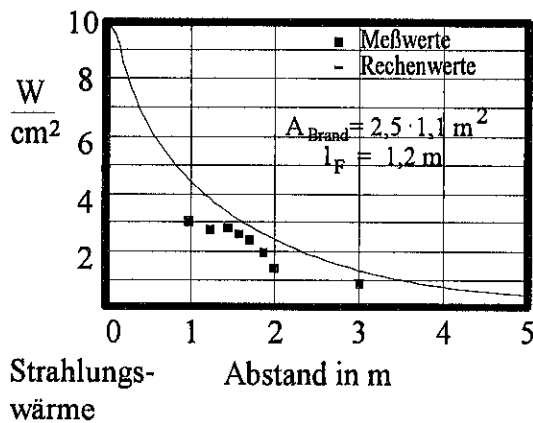


Abbildung 18

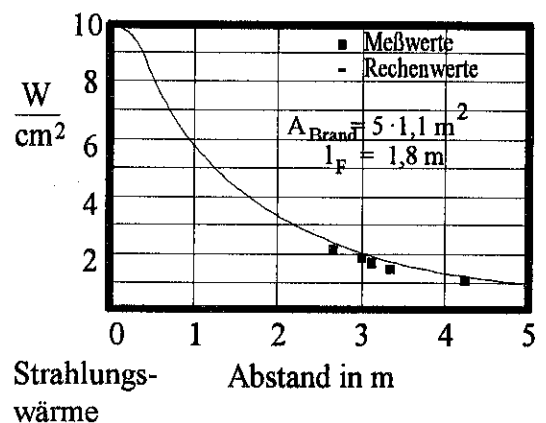


Abbildung 19

A_{Brand} - Brandfläche
 l_F - Flammenlänge

Abbildungen 16-19: Strahlungswärme als Funktion des Abstandes /14, S. 146/

Die Meßpunkthöhe betrug in allen Fällen 1,2 m (ab Oberkante des Behälters).

Die Strahlungsintensität bei 0 m Abstand lag in allen Fällen bei $10 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Je nach Brandfläche und Flammenlänge nahm die Strahlungswärme unterschiedlich ab. Bei einer Flammenlänge von 2,5 m und einer Brandfläche von $2,5 \cdot 2,5 \text{ m}^2$ (Abbildung 16) lag die Strahlungswärme nach einem Meter Abstand bei $5,5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, nach 3 m bei $1,6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ und nach 5 m bei $0,6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Die Meßwerte stimmten gut mit den Rechenwerten überein.

Bei einer Brandfläche von $2,5 \cdot 1,1 \text{ m}^2$ und einer Flammenlänge von 1,2 m (Abbildung 18) lagen die Werte für die Strahlungswärme bei $4,5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ nach 1 m, bei $0,9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ nach 3 m und bei $0,3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ nach 5 m Abstand. Die Meßwerte wichen von der Kurve, die durch Rechenwerte ermittelt wurde, ein wenig ab.

Die Strahlungswärme für eine Brandfläche von $5 \cdot 5 \text{ m}^2$ und einer Flammenlänge von 2,5 m (Abbildung 17) nahm Werte an, die bei $6,5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ nach 1 m, $2,7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ nach 3 m und $1,2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ nach 5 m Abstand lagen. Meß- und Rechenwerte lagen gut beieinander.

Werte von $6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ nach einem Meter, $2,1 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ nach 3 m und $1 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ nach 5 m ließen sich bei einer Brandfläche von $5 \cdot 1,1 \text{ m}^2$ und einer Flammenlänge von 1,8 m feststellen (Abbildung 19). Die Meßwerte ordneten sich gut in die theoretisch gegebenen Rechenwerte ein.

Bei einem weiteren Versuch (Abbildung 20) hatte die Brandfläche einen Durchmesser von 1,6 m und die Flammenlänge betrug 2,6 m. Der Meßpunkt hatte dabei eine Höhe von 0,01 m (ab Oberkante des Behälters).

Als Strahlungsintensität wurden ca. $5,4 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ gemessen. Dieser Wert nahm schon nach 2 m stark ab, so daß nur noch eine Strahlungswärme von $1 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ zu verzeichnen war. Von nun war eine kontinuierliche Abnahme der Strahlungswärme mit dem Abstand zu beobachten. Nach 5 m wurden $0,3 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, nach 10 m $0,1 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ gemessen. Nach 12 m war Strahlungswärme kaum noch wahrzunehmen. Meß- und Rechenwerte stimmten hierbei gut überein.

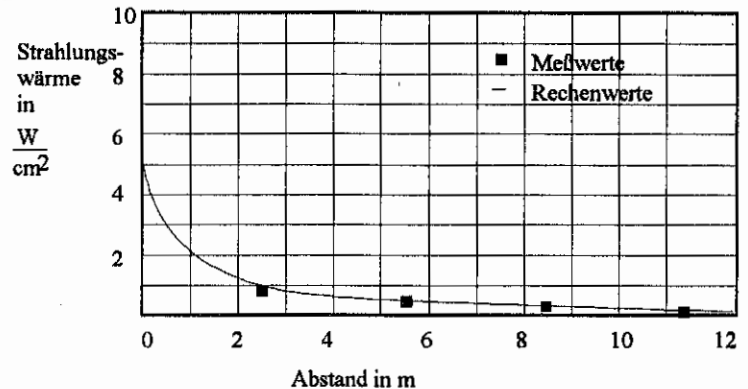


Abbildung 20: Strahlungswärme als Funktion des Abstandes für Dieselkraftstoff /14, S. 147/

Bei diesem Versuch (Abbildung 21) wurde ebenfalls wieder Dieselkraftstoff als Brandmedium benutzt. Die Meßpunkthöhe betrug 0,01 m (ab Oberkante des Behälters), der Brandflächendurchmesser 2 m und die Flammenlänge 2,6 m.

Als Strahlungsintensität wurden hierbei $9 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ gemessen. Auch dieser Wert sank in den ersten 2 m stark ab, nämlich auf $1,4 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Danach sank die Strahlungswärme

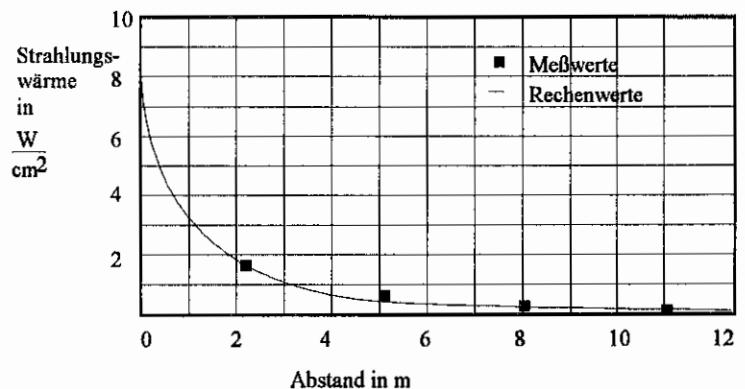


Abbildung 21: Strahlungswärme als Funktion des Abstandes für Dieselkraftstoff /14, S. 147/

kontinuierlich. Nach 5 m wurden somit $0,5 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, nach 10 m ca. $0,15 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ und nach 12 m $0,1 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ gemessen. Die Meß- und Rechenwerte ergänzten sich hierbei sehr gut zu einer Kurve.

Als Auswertung der beiden letzten Diagramme läßt sich sagen, daß mit der Größe des Brandflächendurchmessers auch die Werte für die Strahlungswärme ansteigen. Dies läßt sich auch anhand der nächsten Tabelle gut feststellen.

Brandmedium Dieselkraftstoff	Strahlungsintensität [$\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$] bei einem Abstand von		
	1 m	5 m	
Brandfläche [m^2]	2,5·2,5	5,5	0,6
	5·5	6,5	1,2
	2,5·1,1	4,5	0,3
	5·1,1	5,8	1,0
Brandflächen- durchmesser	1,6 m	2,1	0,4
	2,0 m	3,3	0,5

Tabelle 10: Wärmestrahlungsintensitäten in 1 m und 5 m Abstand für Dieselkraftstoff

6.2.2.3. Versuche mit Dieselöl

Zur Ermittlung der Strahlungswärme beim Abbrand von Dieselöl wurden verschiedene Versuche durchgeführt. Aus den unterschiedlichen Brandwannendurchmessern (d) resultierten unterschiedliche Flammenlängen (l_f). Die Meßpunkthöhe betrug 1,5 m (ab Oberkante Behälter). Die Ergebnisse der Versuche sind in der Abbildung 22 dargestellt.

Die Strahlungsintensität betrug aber in allen drei Fällen $3 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Die höchsten Werte für die Strahlungswärme wurden mit einem Brandwannendurchmesser von 2,5 m und einer Flammenlänge von 5 m erzielt. Sie verringerten sich von $3 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ auf $1,2 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (bei $r/d = 0,6$), $0,6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (bei $r/d = 1,2$) und $0,3 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (bei $r/d = 2$).

Bei einem Durchmesser von 8 m und einer Flammenlänge von 4 m lagen die Werte für die Strahlungswärme bei z.B. $0,6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (bei $r/d = 0,6$), $0,2 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (bei $r/d = 1,2$) und bei $0,4 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (bei $r/d = 2$).

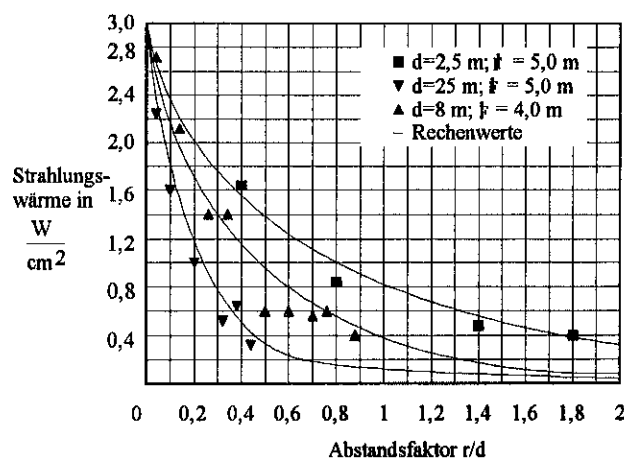


Abbildung 22: Strahlungswärme als Funktion des Abstandes für Dieselöl [14, S. 147]

Werte von z.B. $0,28 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (bei $r/d = 0,6$), $0,09 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (bei $r/d = 1,2$) und $0,02 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (bei $r/d = 2$) erhielt man bei einem Durchmesser von 25 m und einer Flammenlänge von 5 m.

6.2.2.4. Weitere Versuche

Bei der Untersuchung von Treibstoff-Flächenbränden wurden nach RICHTER /25/ auf eine Testfläche von 200 m^2 2000 l brennbare Flüssigkeit (1700 l Turbinenkraftstoff T1 und 300 l Flugzeugkraftstoff B 78) gegeben.

	Kraftstoff T1	Kraftstoff B 78
Dichte ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	0,809	0,721
Flammpunkt ($^{\circ}\text{C}$)	34	-
Heizwert ($H_u, \text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$)	10370	10550
Siedebeginn ($^{\circ}\text{C}$)	149	49

11 Sekunden nach der Zündung stand die 200 m^2 - Fläche in Flammen. Die Höhe der Flammenfront betrug ca. $0,7 \dots 1,20 \text{ m}$ bei einer Windgeschwindigkeit von $7,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,5 \text{ m}$ neben der brennenden Fläche). Die ermittelte Flammentemperatur betrug $1165 \text{ }^{\circ}\text{C}$. In einer Entfernung von $0 \dots 0,5 \text{ m}$ wurde eine Wärmestrahlungsintensität von $4,1 \dots 5 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ gemessen.

Bei weiteren experimentellen Untersuchungen an einem brennenden Treibstofftank ($\varnothing = 25 \text{ m}$; $H = 4,50 \text{ m}$; $V = 70000 \text{ l}$; Angaben zur Art des Treibstoffes fehlen) wurden in unmittelbarer Nähe des oberen Tankrandes Flammentemperaturen von 929°C bis 1113°C gemessen. Der gemessene Spitzenwert der Strahlungsintensität wird mit $3,5 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ angegeben. Das wären Größenordnungen, so RICHTER, wie sie bei der Atombombendetonation in Hiroshima 1000 m vom Hypozentrum auftraten.

SEEGER, der in /24/ die Wärmeübertragung durch Strahlung von einem brennenden Objekt auf die Umgebung untersucht, weist unter Zugrundelegung getroffener Annahmen (Flammdicke $> 1 \text{ m} \Rightarrow 0,9 \leq \varepsilon \leq 1$, daher Anwendung der Beziehung nach Stefan-Boltzmann möglich; konstante Abbrandgeschwindigkeit; Ausschluß von Absorption und Streuung durch Wasserdampf, Kohlendioxid und Staub; Temperatur und Emissionsvermögen konstant und an jedem Ort der Flamme gleich) die grundsätzliche Übereinstimmung der nach dem Stefan-Boltzmann'schen Gesetz () theoretisch ermittelten Werte für Strahlungsintensitäten mit den bei Originalbrandversuchen gemessenen aus, wobei der theoretischen Berechnung, aus Sicherheitsüberlegungen heraus, das Winkelverhältnis nach Gleichung (40) zugrundegelegt wurde.

Die Originalbrandversuche erfolgten an drei mit dem Brennstoff Gasöl III (Dichte: $0,842 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; Flammpunkt: 65°C ; unterer Heizwert: $42945 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) gefüllten Modelltanks der

Höhe 2 m und den Durchmessern von jeweils 1,28 m, 1,6 m und 2,0 m bei unterschiedlichen Füllhöhen von jeweils 1,8 m, 1,0 m und 0,2 m.

Die beste Übereinstimmung der gemessenen Strahlungsintensität mit der theoretisch berechneten (Annahmen: $\varepsilon = 0,9$; Flammentemperatur = 900°C ; auf Tankdurchmesser bezogene Flammenlänge $l/d = 1,5$) konnte bei allen Tankdurchmessern bei der höchsten Füllhöhe von 1,8 m erreicht werden.

Der Maximalwert der gemessenen Strahlungsintensitäten von ca. $3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ konnte bei ungekühltem Tank (Tankdurchmesser = 2 m; Füllhöhe = 1,8 m) in einem Abstand von 3 m von der Tankachse in Höhe von 1 m über der Tankwandoberkante ermittelt werden.

Bei Untersuchungen von Wärmestrahlschutzanzügen (WSA) unterschiedlicher Bauart (Prüfungen 1 - 8) auf der Basis der Festlegungen in den Richtlinien über die Prüfung von Hitzeschutzanzügen der Seeberufsgenossenschaft Hamburg wurden mittels einer durch geeignete Anordnung von Brennern (Methan-Luftgemisch) erzeugten Flammenwand vorgeschriebener Größe (1,6x1,5 m) im Abstand von 1,7 m folgende Werte gemessen /26/:

Prüfung	Energieeintrag (kW)	Flammentemperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Raumtemperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Strahlungsintensität ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Temperatur WSA (außen) ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatur WSA (innen) ($^{\circ}\text{C}$)
1	1000	1180	360	1,20	220	60
2	1000	1200	360	1,25	280	60
3	1000	1250	360	1,40	250	48
4	1000	1170	220	1,00	-	-
5	1000	1200	360	1,25	230	100
6	1000	1200	360	1,25	280	48
7	1000	1180	350	1,20	210	50
8	1000	1100	360	1,50	240	70
Ø	1000	1185	341	1,26	244	62

6.3. Festlegungen in Normen zu Strahlungsintensitäten bei der Prüfung von Schutzbekleidung

DIN EN 366

Schutzbekleidung; Schutz gegen Hitze und Feuer; Prüfverfahren: Beurteilung von Materialien und Materialkombinationen, die einer Hitze-Strahlungsquelle ausgesetzt sind; Deutsche Fassung prEN 366:1993

8. Prüfbedingungen

Die Wärmestromdichte der einfallenden Strahlung sollte, unter Berücksichtigung des vorgesehenen Einsatzes des Prüfmusters, aus folgenden Werten ausgewählt werden:

5 (0,5), 10 (1,0), 20 (2,0), 30 (3,0), 40 (4,0) und 80 (8,0) $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)

DIN EN 407 Ausgabe April 1994

Schutzhandschuhe gegen thermische Risiken (Hitze und/oder Feuer)

Deutsche Fassung EN 407:1994

6.6 Strahlungswärme

Prüfung in Anlehnung an EN 366:1993, Methode B, bei einer Wärmestromdichte $q_0=20$ (2,0) $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)

Entwurf DIN EN 531 Ausgabe November 1991

Schutzkleidung für hitzeexponierte Industriearbeiter (mit Ausnahme von Schutzkleidung für die Feuerwehr und für Schweißer; Deutsche Fassung prEN 531:1991

7.3 Wärmestrahlung

Die Prüfung ist entsprechend prEN 366 bei einer Wärmestromdichte von 20 (2,0) $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$) durchzuführen.

Entwurf DIN EN 659 Ausgabe Mai 1992

Feuerwehrschtzhandschuhe; Schutz gegen Hitze und Flammen; Deutsche Fassung prEN 659:1992

4.7 Strahlungswärme

Die Prüfung wird nach prEN 366 mit einer Wärmestromdichte $q_0=20$ (2,0) $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$) durchgeführt.

DIN 4843 Ausgabe Dezember 1988

Schutzschuhe; Sicherheitstechnische Anforderungen; Prüfung

6.26.2 Verhalten gegenüber Strahlungswärme

Die Prüfung wird nach DIN 4842, jedoch mit einer Wärmestromdichte $q_0=2$ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$, über einen Zeitraum von 5 min durchgeführt.

6.4. Zusammenfassung der Ergebnisse aus Originalbränden und Modellbrandversuchen und in Auswertung der Festlegungen in Prüfnormen

Aus den geführten Untersuchungen zu auftretenden Strahlungsintensitäten bei Original- und Modellbränden konnten den Literaturangaben folgende Maximalwerte auftretender Strahlungsintensitäten entnommen werden:

Feste Brandstoffe - $7 W \cdot cm^{-2}$

Flüssige Brandstoffe - $10 W \cdot cm^{-2}$

Die Festlegungen in Prüfnormen weisen einen Maximalwert von $8 W \cdot cm^{-2}$ aus.

Diese Werte liegen sehr hoch, da sie in der Regel auf einen Abstand = 0 vom jeweiligen Brandobjekt bezogen sind. In der Praxis des Feuerwehreinsatzes wird jedoch der Abstand der Einsatzkraft vom Brandherd mindestens der Wurfweite eines Strahlrohres entsprechen. Reduziert man diesen Abstand noch auf 3 m und geht von einer dort vorhandenen Strahlungsintensität von $3 W \cdot cm^{-2}$ aus, dürfte das eine hinreichende Größenordnung und zugleich eine Bezugsbasis für die angedachte Simulation der Wärmestrahlung eines Brandes sein. Diese Größenordnung stimmt auch mit dem von SEEGER /24/ ermittelten und auf Seite 37 dargelegten Wert der Strahlungsintensität überein. Belegt als von der Größenordnung her ausreichend, wird dieser Wert auch durch die am Institut der Feuerwehr ermittelten Werte, die in geringerem Abstand gemessen, nur etwa 50 % des vorgenannten Strahlungsintensitätswertes erreichten, von ihrer Wirkung her (maximale Aufenthaltsdauer eines Probanden im Wärmestrahlschutzanzug = 7 min) jedoch eine enorme Beanspruchung darstellten.

Der Wert $3 W \cdot cm^{-2}$ war denn auch Ausgangsbasis für Betrachtungen zur Dimensionierung einer Anlage, mittels derer, zum Zwecke der Prüfung persönlicher Schutzausrüstung, diese Größenordnung an Strahlungsintensität reproduzierbar erzeugt werden sollte.

Die Auswahl einer dementsprechenden Anlage sollte dabei unter folgenden Aspekten erfolgen:

- Erforderliche Strahlerfläche, auch in Hinblick auf das angestrebte Ziel, komplette Schutzausrüstungen in bezug auf thermische Beanspruchung zu prüfen;
- Einzusetzendes Brenn-(Brand)medium unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Aspekte;
- Reproduzierbarkeit der Parameter der Anlage.

7. Dimensionierung einer Anlage zur reproduzierbaren Simulation der Brandkenngröße "Wärmestrahlung"

7.1 Rechnerische Ermittlung der Wärmestromdichte als Funktion der Strahlerfläche und des Abstandes

Zunächst unabhängig von einem geeigneten brennbaren Medium wurde unter den getroffenen Annahmen:

$$T_1 = 1000 \text{ °C}$$

$$T_2 = 25 \text{ °C}$$

$$\epsilon_1 = 0,9$$

$$\epsilon_2 = 0,7$$

nach Berechnungsgleichung (23) untersucht, welche Wärmestromdichten oder Strahlungsintensitäten sich unter Berücksichtigung der Strahlerflächengröße und des Abstandes von der Strahlerflächenoberfläche ergeben. Im Ergebnis sollte der Nachweis der Realisierbarkeit einer Strahlungsintensität von $3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ auf der Grundlage der getroffenen Annahmen erbracht werden.

Die grafische Darstellung in Abbildung 23 weist die Berechnungsergebnisse aus.

Daraus ist zu entnehmen, daß durch jede Größe der in die Berechnungen einbezogenen Strahlerflächen der Wert der Strahlungsintensität von $3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ erreicht werden kann.

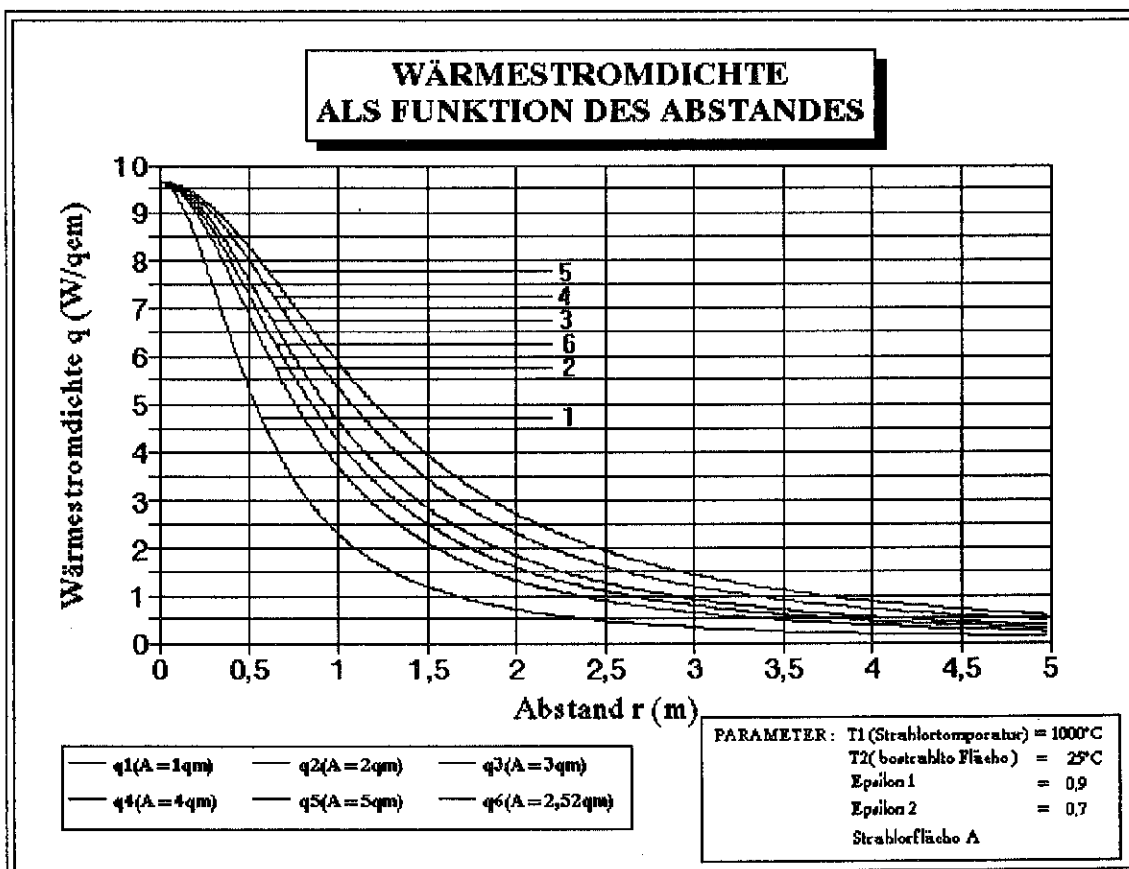


Abbildung 23: Wärmestromdichte als Funktion des Abstandes

Unter dem Aspekt der bestehenden Forderung, komplette Schutzausrüstungen prüfen zu können, bietet sich die Realisierung einer Anlage mit einer strahlenden Fläche von mindestens 2 m² an.

7.2. Auswahl des geeigneten Brandmediums zur Simulation der geforderten Wärmestrahlungsintensität

Die im Rahmen der Simulation zu realisierende Wärmestrahlungsintensität von $3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ könnte theoretisch durch den Abbrand folgender brennbarer Stoffe realisiert werden:

- Holz, Kohle, Papier, Plaste (z.B. PVC, PP, PS, PUR, PE) als Vertreter des festen Aggregatzustandes.
- Benzine (Flug-, Wund- und Waschbenzin, Kerosin, Traktorenkraftstoff), Benzol als flüssige Brennstoffe.
- Wasserstoff, Methan, Ethan, Propan, Butan als gasförmige Brennstoffe.

Tabelle 11 stellt auf der Grundlage einer für die Realisierung der geforderten Wärmestromdichte angenommenen Leistung von 140 kW die pro Zeiteinheit zu verbrennende Masse brennbaren Materials dar.

Tabelle 11: Heizwerte und zu verbrennende Menge der vorgeschlagenen Stoffe /23/

Stoff	Heizwert in MJ·kg ⁻¹	zu verbrennende Menge in kg·h ⁻¹
Holz	17,8 ... 20	26,66
Steinkohle	29	17,37
Papier	13,4 ... 17,6	32,55
Plaste: PVC-hart	17,3 ... 23	25,08
PVC-weich	26	19,39
PUR	26,7 ... 27,6	18,66
PS	39,9	12,63
PE	43,2	11,66
PP	43,0	11,72
Benzine	41,9 ... 46,8	11,38
Benzol	38,5 ... 40,6	12,76
Wasserstoff	120,04	4,19
Methan	50,003	10,08
Ethan	47,3 ... 48	10,59
Propan	46,5	10,84
Butan	45,6	11,05

Die geforderte Wärmestrahlungsintensität könnte auch auf elektrischem Wege, z.B. mittels elektrischer Infrarotstrahler realisiert werden.

Diese Variante mußte wegen der Nichtrealisierbarkeit des damit verbundenen hohen elektrischen Anschlußwertes von vornherein verworfen werden.

Das Abbrennen der in Tabelle 11, Zeilen 2 und 3, genannten brennbaren Materialien zur Erzeugung einer Flammenwand, aus der die geforderte Strahlungsintensität resultieren sollte, wurde ebenfalls aus Gründen der schlechten Reproduzierbarkeit der Flamme (Einfluß meteorologischer Bedingungen usw.) sowie wegen der damit verbundenen ökologischen Probleme verworfen.

Aus den vorgenannten Gründen fiel die Entscheidung zugunsten einer Propangas - Wärmestrahlerwand aus, die die Vorteile "ökonomisch" und "umweltfreundlich" auf sich vereinen und zudem das grundlegende Erfordernis nach Reproduzierbarkeit der Parameter erfüllen konnte.

7.3. Berechnung der Wärmestrahlung einer Strahlerwand hinsichtlich ihrer Eignung für die Simulation der Wärmestrahlung

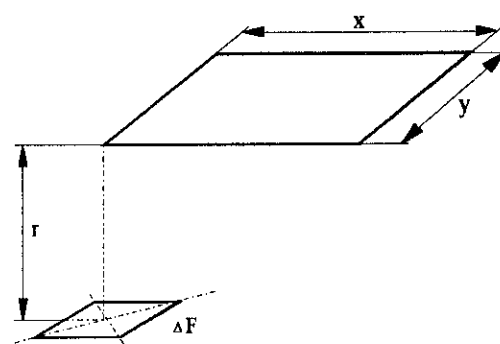
Auf der Grundlage folgender Voraussetzungen für eine Propangasstrahlerwand:

- Oberflächentemperatur der Strahler: 1000 °C
- maximale Strahlungsintensität: 3 W·cm⁻²
- Gesamtstrahlerfläche: ca. 2 m²

wurde eine durch eine Firma angebotene Propangas-Wärmestrahlerwand, schematisch in Abbildung 26 dargestellt, dahingehend berechnet, ob sie den geforderten Strahlungsintensitätswert von 3 W·cm⁻² erreicht.

7.4. Berechnung der Strahlerwand

Der Berechnung wurde das Winkelverhältnis zwischen einem parallel zu einer Rechteckfläche liegenden Flächenelement und der Rechteckfläche, wobei eine Ecke der Rechteckfläche in der Mittelsenkrechten des Flächenelementes liegt, zugrunde gelegt:



(s. Abbildung 9)

$$\Phi_{12} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{x}{\sqrt{x^2 + r^2}} \cdot \arctan \frac{y}{\sqrt{x^2 + r^2}} + \frac{y}{\sqrt{y^2 + r^2}} \cdot \arctan \frac{x}{\sqrt{y^2 + r^2}} \right] \quad (\text{s. Gl. 40})$$

Erfüllt die geometrische Anordnung zweier parallel oder senkrecht zueinander stehenden Flächen nicht die obengenannten Forderungen, so kann man dies erreichen, indem man die eine Fläche in Teilrechtecke zerlegt (siehe Abbildung 25). Für diese Teilrechteckflächen können dann die Winkelverhältnisse bestimmt und durch sinngemäße Addition bzw. Subtraktion das gesuchte Winkelverhältnis gefunden werden. /24/

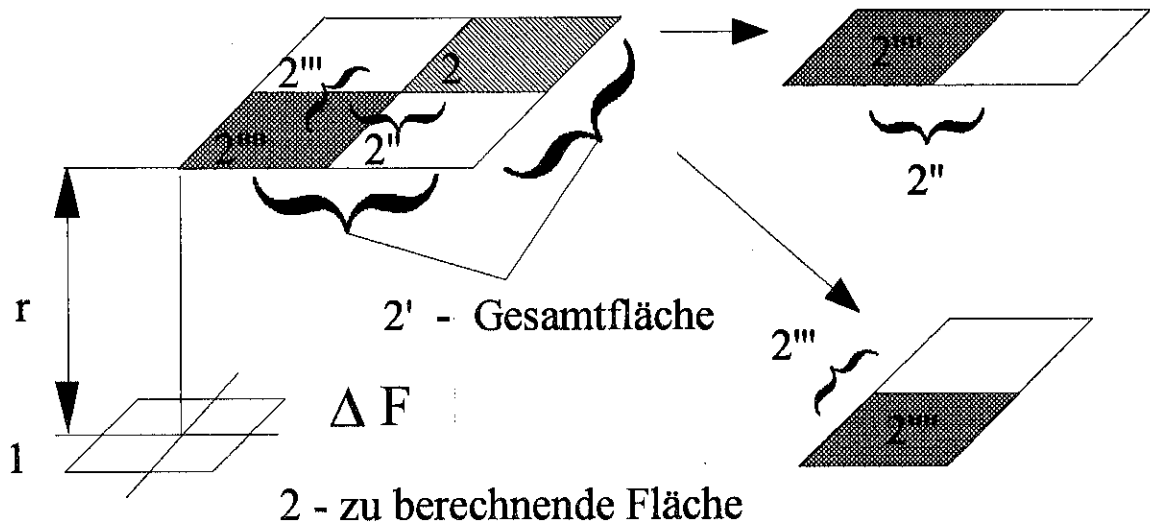


Abbildung 25: Zerlegung einer Fläche in Teilrechtecke zur Bestimmung des Winkelverhältnisses

Z.B.:

$$\varphi_{1,2} = \varphi_{1,2'} - \varphi_{1,2''} - \varphi_{1,2'''} + \varphi_{1,2''''} \quad (43)$$

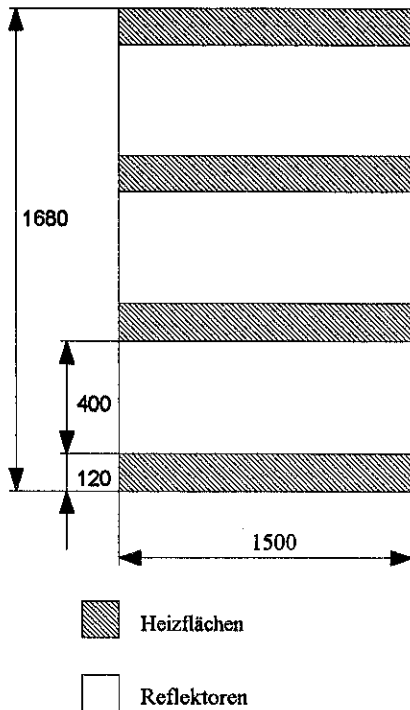
7.5. Berechnung der Flächenanteile der Strahlerwand

KUNZE /22/ untersuchte Brände in Modellräumen mit bestimmten Öffnungsanteilen (Fenster). Da in diesem Fall nicht die Gesamtfläche als Strahlerfläche anzusehen ist, sondern nur Teilflächen (Fensteröffnungen) strahlen, wurde folgende vereinfachte rechnerische Beziehung, bei der der prozentuale Öffnungsanteil Berücksichtigung findet, angewandt.

$$q_i = q_r \cdot \frac{P}{100} \quad (44)$$

- q_i - von der imaginären Öffnung ausgehender Wärmestrom
- q_r - von den realen Öffnungen ausgehender Wärmestrom
- P - prozentualer Anteil der Fensterfläche an der Gesamtfläche

Diese Beziehung kam zunächst auch für eine vereinfachte Berechnung der Strahlungsintensität der Propangas - Wärmestrahlerwand zur Anwendung, da ja hier auch nur Teilflächen strahlen. Zunächst wurden die Flächenanteile berechnet.



Flächenanteile:

Gesamtfläche: $1,5 \times 1,68 \text{ m}^2 = 2,52 \text{ m}^2$

davon:

- Reflektorfläche: $0,4 \times 1,5 \text{ m}^2 = 0,6 \text{ m}^2 \cdot 3 = 1,8 \text{ m}^2$

- Heizungsfläche: $0,12 \times 1,5 \text{ m}^2 = 0,18 \text{ m}^2 \cdot 4 = 0,72 \text{ m}^2$

prozentuale Anteile:

$$\frac{x}{1,8 \text{ m}^2} = \frac{100\%}{2,52 \text{ m}^2}$$

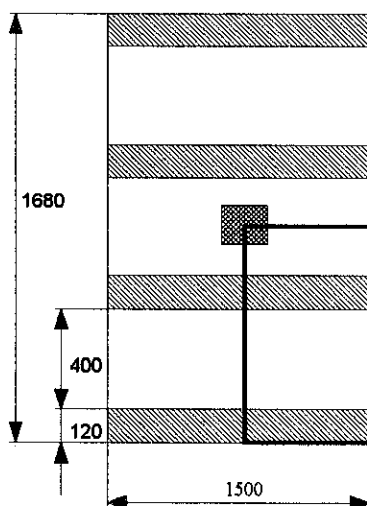
$$x = 71,42\% \text{ Reflektorfläche}$$

$$\frac{x}{0,72 \text{ m}^2} = \frac{100\%}{2,52 \text{ m}^2}$$

$$x = 28,57\% \text{ Heizungsfläche}$$

Abbildung 26: Vereinfachte Darstellung der Strahlerwand

7.6. Vereinfachte Berechnung des Winkelverhältnisses $\varphi_{1,2}$



Umwandlung
auf Fall 1 (s. 9.1.)

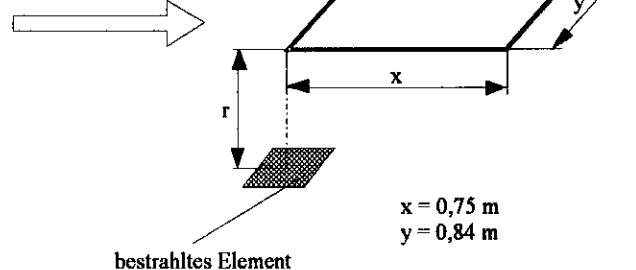


Abbildung 27: Zerlegung der Strahlerwand zur Berechnung des Winkelverhältnisses

$$\varphi_{12} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{x}{\sqrt{x^2 + r^2}} \cdot \arctan \frac{y}{\sqrt{x^2 + r^2}} + \frac{y}{\sqrt{y^2 + r^2}} \cdot \arctan \frac{x}{\sqrt{y^2 + r^2}} \right] \quad (\text{s. Gl. 40})$$

Ausgewählte Ergebniswerte φ_{12} bei verschiedenen Abständen r

$r = 0 \text{ m} :$	$\varphi_{1,2} = 0,99999$
$r = 0,5 \text{ m} :$	$\varphi_{1,2} = 0,75536$
$r = 1 \text{ m} :$	$\varphi_{1,2} = 0,43946$
$r = 1,5 \text{ m} :$	$\varphi_{1,2} = 0,2601569$
$r = 2 \text{ m} :$	$\varphi_{1,2} = 0,1658142$
$r = 2,5 \text{ m} :$	$\varphi_{1,2} = 0,11313$
$r = 3 \text{ m} :$	$\varphi_{1,2} = 0,051505$
$r = 3,5 \text{ m} :$	$\varphi_{1,2} = 0,061266$
$r = 4 \text{ m} :$	$\varphi_{1,2} = 0,047623$
$r = 4,5 \text{ m} :$	$\varphi_{1,2} = 0,038027$
$r = 5 \text{ m} :$	$\varphi_{1,2} = 0,031037$

7.7. Vereinfachte Berechnung der Intensität des Wärmestrahlungsflusses

$$q = \varepsilon_{1,2} \cdot C_S \cdot \varphi_{1,2} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (\text{s. Gl. 23})$$

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_1 = 0,9 \\ \varepsilon_2 = 0,7 \end{array} \right\} \varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = 0,64948$$

$$C_S = 5,67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

$$T_1 = 1000 \text{ }^\circ\text{C} = 1273 \text{ K}$$

$$T_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$$

Ausgewählte Ergebniswerte q nach Gleichung (44)

$0 \text{ m} :$	$q = 96416,482 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 0,2857 = 27546,189 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
$0,5 \text{ m} :$	$q = 72829,882 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 0,2857 = 20807,497 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
$1 \text{ m} :$	$q = 42371,611 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 0,2857 = 12105,569 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
$1,5 \text{ m} :$	$q = 25083,664 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 0,2857 = 7166,4028 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
$2 \text{ m} :$	$q = 15987,382 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 0,2857 = 4567,595 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
$2,5 \text{ m} :$	$q = 10907,706 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 0,2857 = 3116,3316 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
$3 \text{ m} :$	$q = 7858,5039 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 0,2857 = 2245,1746 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

$$3,5 \text{ m} : q = 5907,1112 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 0,2857 = 1687,6617 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$4 \text{ m} : q = 4591,688 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 0,2857 = 1311,8453 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$4,5 \text{ m} : q = 3666,4662 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 0,2857 = 1047,5094 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$5 \text{ m} : q = 2992,5083 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 0,2857 = 854,95962 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

(0,2857 = prozentualer Anteil der Heizungsfläche)

7.8. Genaue Berechnung der Intensität der Wärmestrahlung

Zur genaueren Berechnung muß die Gesamtfläche, wie unter 9.1. erläutert, zerlegt werden. Zur Überprüfung des Modells der vereinfachten Berechnung mit dem der exakten Berechnung gemäß 9.1. wurde mittels Computer die exakte Berechnung durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnung für die Teilflächen sind grafisch in Abbildung 28 dargestellt.

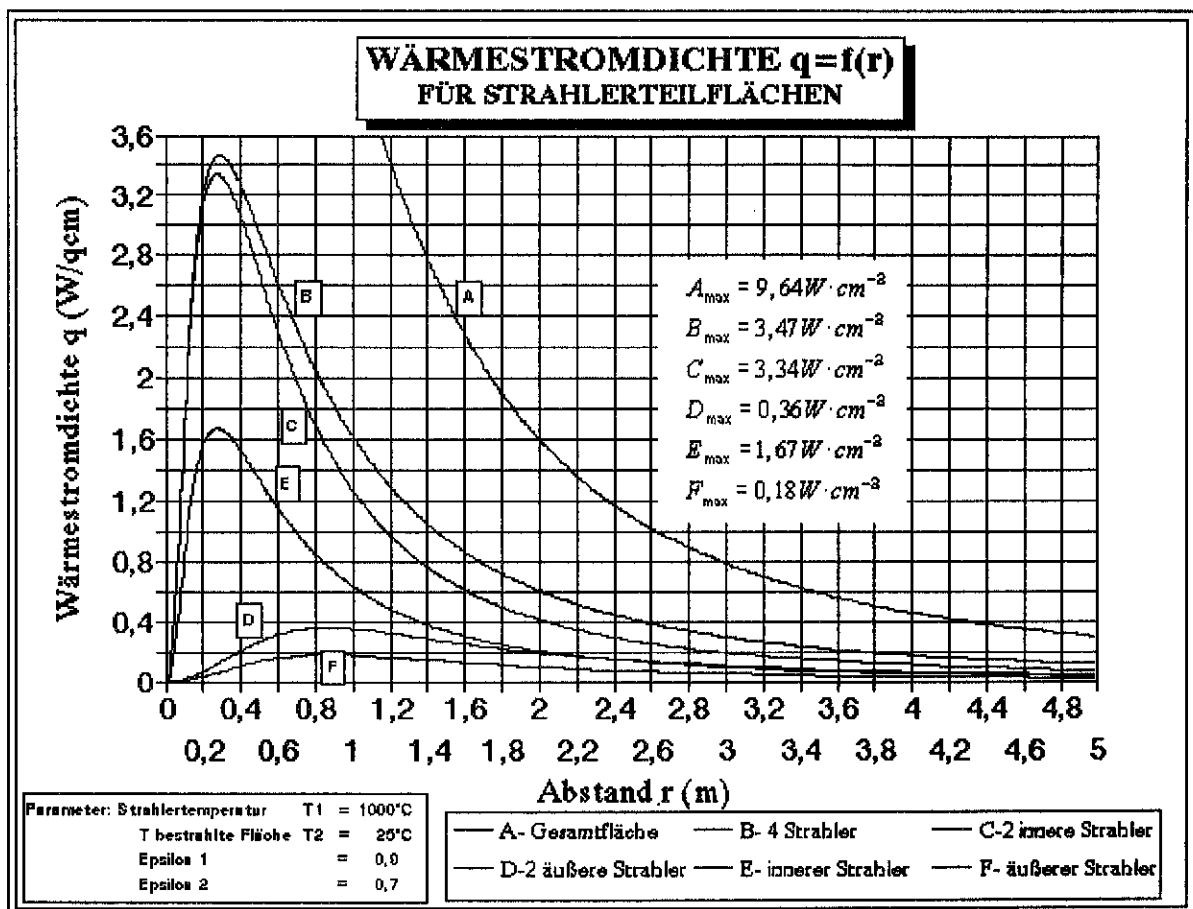


Abbildung 28: Wärmestromdichte $q = f(r)$ für Strahlerteilflächen

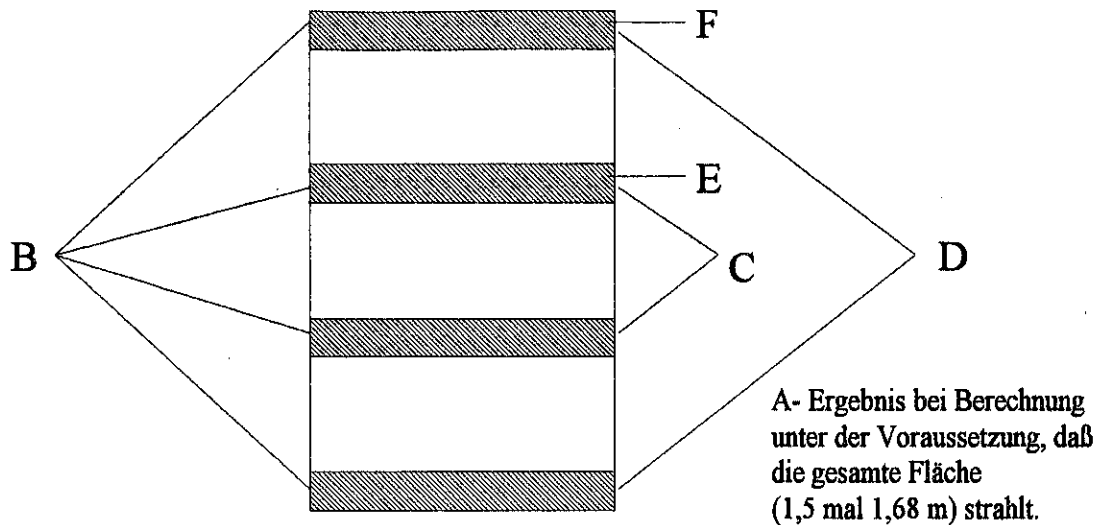


Abbildung 29: Darstellung der Strahlerteilflächen, denen die Kurven in Abbildung 28 entsprechen

Es ist festzustellen, daß die Maxima nicht im Abstand $r = 0$ m liegen, sondern sich nach rechts verschieben.

Für die beiden äußeren Strahlerflächen (Kurve D) wird z.B. ein maximaler Wert von $0,38 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ nach $0,9$ m erreicht. Die beiden inneren Strahlerflächen (Kurve C) erreichen ihr Maximum von $3,3 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ dagegen schon nach $0,3$ m. Beim Betrieb aller vier Strahlerflächen (Kurve B) beträgt der maximale Wert für die Wärmestromdichte $3,5 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ bei einem Abstand von $0,3$ m.

Der Vergleich der überschlägig berechneten Strahlungsintensität mit der genauen Berechnung (unter den getroffenen Annahmen) weist entsprechende Differenzen aus. So liegt beispielsweise der Wert der maximalen Strahlungsintensität für den Betrieb aller vier Strahlerflächen bei der vereinfachten Berechnung bei $2,75 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (Abstand=0), während der Maximalwert bei genauer Berechnung bei $3,5 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ Abstand= $0,3$ m) liegt.

Die prozentuale Abweichung der vereinfachten gegenüber der exakten Berechnung für verschiedene Abstände ist in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Gegenüberstellung der vereinfachten und exakten Berechnung der Wärmestrahlungsintensität mit abweichendem Fehler :

Abstand r in m	Berechnung von q [$W \cdot cm^{-2}$]		Fehler in % (v gegenüber e)	e/v
	vereinfacht (v)	exakt (e)		
0,5	2,0807	2,9318	29,03	1,409
1,0	1,2105	1,6144	25,02	1,334
1,5	0,7166	0,9480	24,41	1,323
2,0	0,4567	0,6046	24,46	1,324
2,5	0,3116	0,4132	24,59	1,326
3,0	0,2245	0,2980	24,66	1,327
3,5	0,1687	0,2243	24,79	1,330
4,0	0,1311	0,1744	24,83	1,330
4,5	0,1047	0,1394	24,89	1,331
5,0	0,0854	0,1142	25,22	1,337
Durchschnittswerte			25,19	1,337

Aus Tabelle 12 ist ersichtlich, daß die Gegenüberstellung der Methoden zur vereinfachten und exakten Berechnung einen durchschnittlichen Fehler von 25,19 % aufweist. Bezogen auf das Berechnungsbeispiel müßte der vereinfacht berechnete Wert mit dem durchschnittlichen Korrekturfaktor 1,337 multipliziert werden, um den genau berechneten Wert zu erhalten.

Im Ergebnis der genauen Berechnung wurde von der Annahme ausgegangen, daß die ausgewählte Propangas - Wärmestrahlerwand für den vorgesehenen Verwendungszweck geeignet ist, da $3,5 W \cdot cm^{-2} > 3,0 W \cdot cm^{-2}$ (gefordert).

Deshalb wurde diese Wärmestrahlerwand beschafft und am Institut der Feuerwehr installiert. Der konstruktive Aufbau der Strahlerwand sowie die Funktions- und Technische Beschreibung sind aus **Anlage 3** ersichtlich.

Die Bilder 1 bis 3 in **Anlage 2** zeigen die Ansichten der am IdF aufgebauten Propangas - Wärmestrahlerwand sowie, dem vorgesehenen Verwendungszweck der Anlage entsprechend, den Test eines Wärmestrahlerschutzanzuges vor der Wärmestrahlerwand.

8. Vermessen der Strahlerwand

Zur Ermittlung der Strahlungsintensität der Wärmestrahlerwand wurde eine mittels des BOSCH-Profilsystems gefertigte Positioniereinrichtung gebaut. Diese gestattete es, einen wassergekühlten Medtherm-Wärmeflußaufnehmer vom Typ 64 - 10 - 20, parallel zur Strahlerwandoberfläche in x- und y- Richtung (horizontal und vertikal) zu verschieben, wobei der Abstand zur Strahlerwandoberfläche variabel einstellbar war.

Die Meßwerterfassung und -auswertung wurde computergestützt mittels des Systems (Software) DIA/DAGO vorgenommen.

Ermittelt wurden die Werte der Strahlungsintensität in den Ebenen (Paralleler Abstand Strahlerwandoberfläche - Radiameter) 40, 60, 80, 100 und 120 cm. Je Ebene wurden, ausgehend vom Mittelpunkt der Strahlerwand, in Schrittweiten von 50 cm in x-Richtung und 22 cm (der Wert ergibt sich aus der realen Größe der Strahlerteilflächen) in y-Richtung die Werte der Strahlungsintensität meßtechnisch erfaßt.

Direkt am Brennelement wurde außerdem die Strahlerwandoberflächentemperatur mit maximal 1100°C ermittelt.

In **Anlage 1** sind, bezogen auf die einzelnen Meßebenen, die Meßergebnisse grafisch als

- 3 D - Diagramm;
- auf die Ebene projizierte 3 D - Darstellung und
- tabellarisch als Werteausdruck

dargestellt.

Die derart dargestellten Meßergebnisse weisen aus, daß mittels der Propangas-Wärmestrahlerwand unter den gegebenen Meßbedingungen eine maximale Strahlungsintensität von $1,3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ im Abstand von 40 cm von der Strahlerwandoberfläche an den in den Abbildungen 1.1. und 1.2. gekennzeichneten Orten gleicher Strahlungsintensität auftritt.

Durch Vergleich mit den nach Abschnitt 9.4.1. berechneten Strahlungsintensitäten wird deutlich, daß der Maximalwert der (genau) berechneten Strahlungsintensität gegenüber dem meßtechnisch ermittelten Wert bei ungefähr gleichem Abstand um $2,2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ differiert.

Die Ursachen für die nicht geringen Abweichungen liegen begründet in den den Berechnungen zugrundeliegenden Annahmen und der an sich ausschließlichen Gültigkeit des Stefan -Bolzmanschen Gesetzes für schwarze Strahler.

9. Ergebnis der Untersuchungen

Ausgehend vom angedachten Verwendungszweck der Simulation einer, den realen Brandbedingungen entsprechenden, Wärmestrahlungsintensität durch ein geeignetes Verfahren, kann eingeschätzt werden, daß die untersuchte Propangas - Wärmestrahlerwand unter den dargelegten Gesichtspunkten grundsätzlich diesem Anliegen gerecht wird. Insbesondere die Reproduzierbarkeit ihrer Parameter, -ein prinzipieller Grundsatz und Voraussetzung für vergleichende Prüfungen von persönlicher Schutzausrüstung des Feuerwehrangehörigen, stützt diese Aussage.

Die im Vergleich zur rechnerischen Bestimmung im Rahmen des Ausmessens der Wärmestrahlerwand ermittelten geringeren Werte der Wärmestrahlungsintensität lassen vorläufig den Schluß zu, daß die Strahlerwand für Untersuchungen bis zu $1,3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ Verwendung finden kann, für höhere Intensitäten, auch unter dem Aspekt nur kurzer Einwirkzeiten, eine Nachrüstung der Propangas - Wärmestrahlerwand mit weiteren 3 Brennelementen jedoch angeraten erscheint. Dieses ist nach Herstellerangaben problemlos möglich durch den Ersatz der in der jetzigen Ausführungsform noch vorhandenen Reflektoren durch Brennelemente.

10. Zusammenfassung

Ableitend aus dem Gesamtumfang der bei Bränden auftretenden Brandkenngrößen, wird die dominierende Relevanz der Brandkenngröße "Wärmestrahlung" für die Einsatzkräfte der Feuerwehr herausgearbeitet. Neben der Darstellung des naturwissenschaftlichen Hintergrundes der "Wärmestrahlung" als eine Form der Wärmeübertragung, wird in Auswertung von Originalbränden, Modellbrandversuchen und Festlegungen in Prüfnormen versucht, einen für einen Brand repräsentativen Wert der Wärmestrahlungsintensität zu ermitteln, der die Grundlage für die Auslegung einer technischen Anlage zur Simulation der Wärmestrahlung bilden soll. Herausgearbeitet wird in diesem Zusammenhang eine repräsentative Wärmestrahlungsintensität von $3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Mit der Zielstellung der Prüfung der persönlichen Schutzausrüstung des Feuerwehrangehörigen wurden deshalb Untersuchungen zur Simulation der gefundenen einsatzrelevanten Größenordnung an Wärmestrahlung geführt.

Am Beispiel einer Propangas - Wärmestrahlerwand wird deren Eignung für den vorgenannten Verwendungszweck, untersetzt durch Berechnungen und Meßergebnisse, untersucht.

Die Nutzung dieser Anlage, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Reproduzierbarkeit ihrer Parameter, wurde, trotz des vom Vorgabewert $3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ abweichenden Meßergebnisses von nur $1,3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ nachgewiesen. Die Empfehlung der Nachrüstung der Wärmestrahlerwand mit weiteren Brennelementen wurde gegeben.

Literaturverzeichnis

- /1/ Zeyen, H.: "Brandkenngrößen und automatische Brandmelder". In: Technische Rundschau Nr. 18 vom 22.04.1966, S. 17
- /2/ Autorenkollektiv: Lexikon Brandschutz. Staatsverlag der DDR, Berlin 1986
- /3/ Rietz, G.: Lehrmaterial zur Vorlesung "Wissenschaftliche Grundlagen der Brand- und Explosionslehre". Heft 6: Entwicklung und Ablauf von Bränden, Technische Hochschule "Otto von Guericke" Magdeburg, Sektion Apparate- und Anlagenbau, Fachrichtung Brandschutz
- /4/ Bulmann, E.; Cwielong, W.: Erarbeitung eines Lesematerials zum Thema "Wärmeübertragung und Gasaustausch bei Bränden in Räumen". Ingenieur-Abschlußarbeit, Heyrothsberge, Fachschule des Mdl "Hermann Matern" 1981
- /5/ Elsner, N.: "Grundlagen der Technischen Thermodynamik". Band 2, Wärmeübertragung. Akademie-Verlag, Berlin 1993
- /6/ Demidow, P.G.; Sauschew, W.S.: "Verbrennung und Eigenschaften brennbarer Stoffe".
- /7/ Schubert, R.: "Brandgefährdungsanalyse". Berlin: Staatsverlag der DDR, 1988
- /8/ Purt, G.A.: "Einführung in die Brandlehre". Erlenbach, Zürich und Stuttgart: Eugen Rentsch Verlag, 1969
- /9/ Autorenkollektiv: "Brandschutz und Explosionsschutz". Aus Forschung und Praxis. Bd. 17, Berlin: Staatsverlag der DDR, 1989
- /10/ Schack, K.: "Der industrielle Wärmeübergang". Düsseldorf: Verlag Stahleisen mbH, 1983
- /11/ VDI - Wärmeatlas. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1991
- /12/ Stöcker, H.: "Taschenbuch der Physik". Frankfurt a.M., Thun: Verlag Harri Deutsch, 1993
- /13/ Autorenkollektiv: "Brandschutz, Explosionsschutz, Havarieschutz". Forschung, Entwicklung, Praxis. Heft 1, Berlin: Staatsverlag der DDR, 1989
- /14/ Becker, R.; Huth, W.; Müller, E.: "Lagerung brennbarer Stoffe". In TÜ, Bd. 32, (1991), Nr. 4, S. 142-146
- /15/ Seeger, P.G.: "Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion bei Tankbränden als Basis für brandschutztechnische Maßnahmen". In gwf - gas/erdgas, 120 (1979), Heft 1, S. 25-29
- /16/ Autorenkollektiv: "Brandschutz, Explosionsschutz, Havarieschutz". Forschung, Entwicklung, Praxis. Heft 2, Berlin: Staatsverlag der DDR, 1990

- /17/ Resetar, J.: "Die Flammenstrahlung als Ursache für die Entstehung und Ausbreitung eines Brandes". Spravodajca, Bratislava, 17 (1986) 3, S. 13-17
- /18/ Stroppe, H.: "Physik für Studenten der Natur- und Technikwissenschaften". Leipzig: 1990
- /19/ Seeger, P.G.: "Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion bei Bränden in Flüssiggaslagern". In VFDB 1 / 1987, S. 7-12
- /20/ Sjölin, V.: "An experimental study of the radiation from wood flames". In FoU-Brand (Forskning och utveckling-brand), Heft 1, 1974, S. 1-6
- /21/ Altmann, B.R.: "Optimierung des Brandschutzes in Großtankanlagen". In TÜ Bd. 32 (1991), Nr. 4, S. 139-141
- /22/ Kunze, C.: "Herleitung des Gebäudeabstandes unter dem Aspekt der Brandausbreitung". In Schadenprisma 4/87, S. 54-63
- /23/ Autorenkollektiv: "Tabellenbuch brennbarer und gefährlicher Stoffe". Berlin: Staatsverlag der DDR, 1979
- /24/ Seeger, P.G.: "Untersuchung der Wärmeübertragung durch Strahlung von einem brennenden Objekt auf die Umgebung". Forschungsbericht Nr. 22 der Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz (AGF), 1974
- /25/ Richter, K.H.: "Hitze; Biologische Wirkungen, arbeitshygienische Bedeutung und Schutzmöglichkeiten", Berlin: Staatsverlag der DDR, 1966
- /26/ Unveröffentlichtes Material

ANLAGE 1

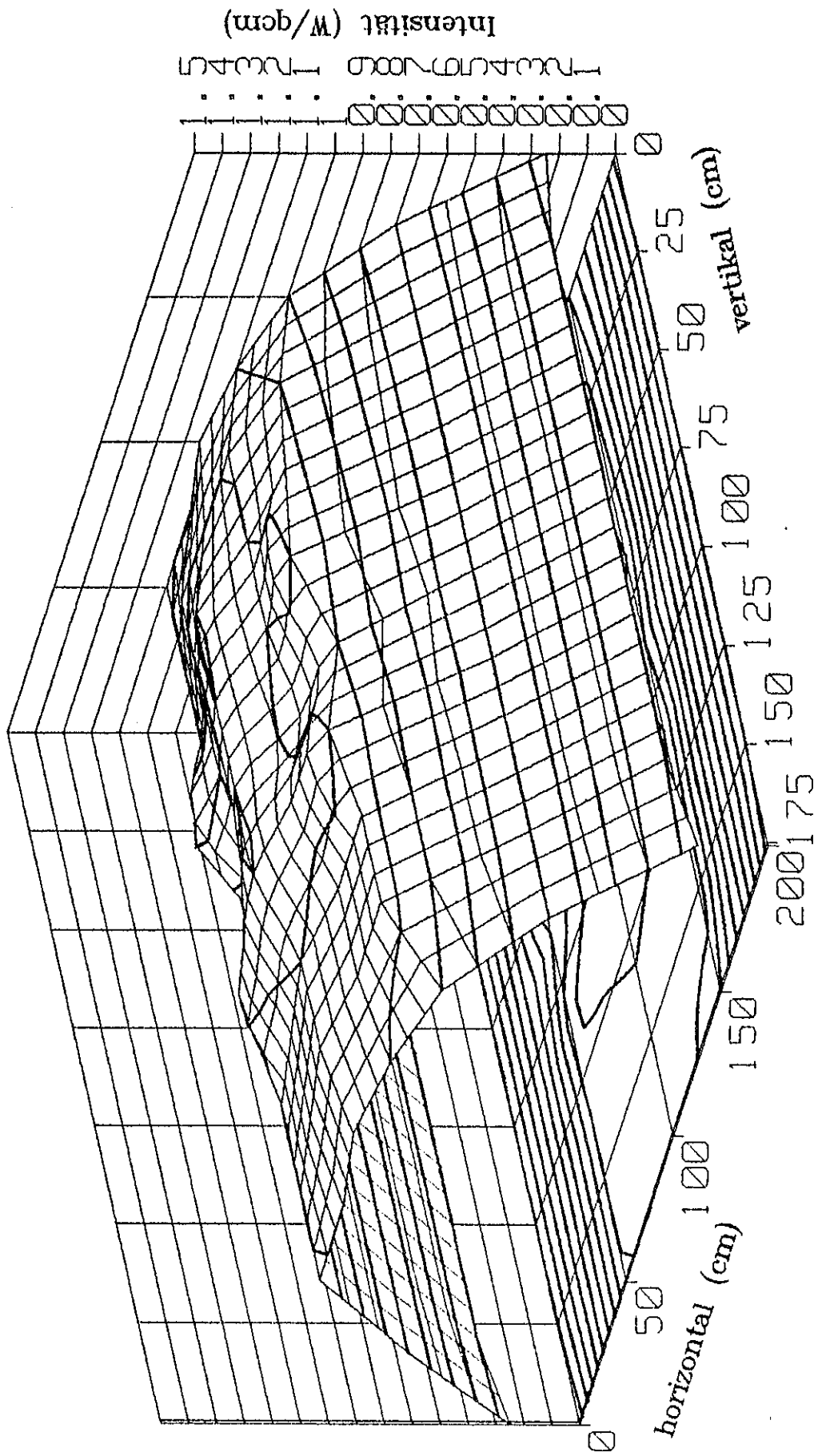


Abb. 1.1.: Strahlungsintensität Ebene 40 - Räumliche Darstellung

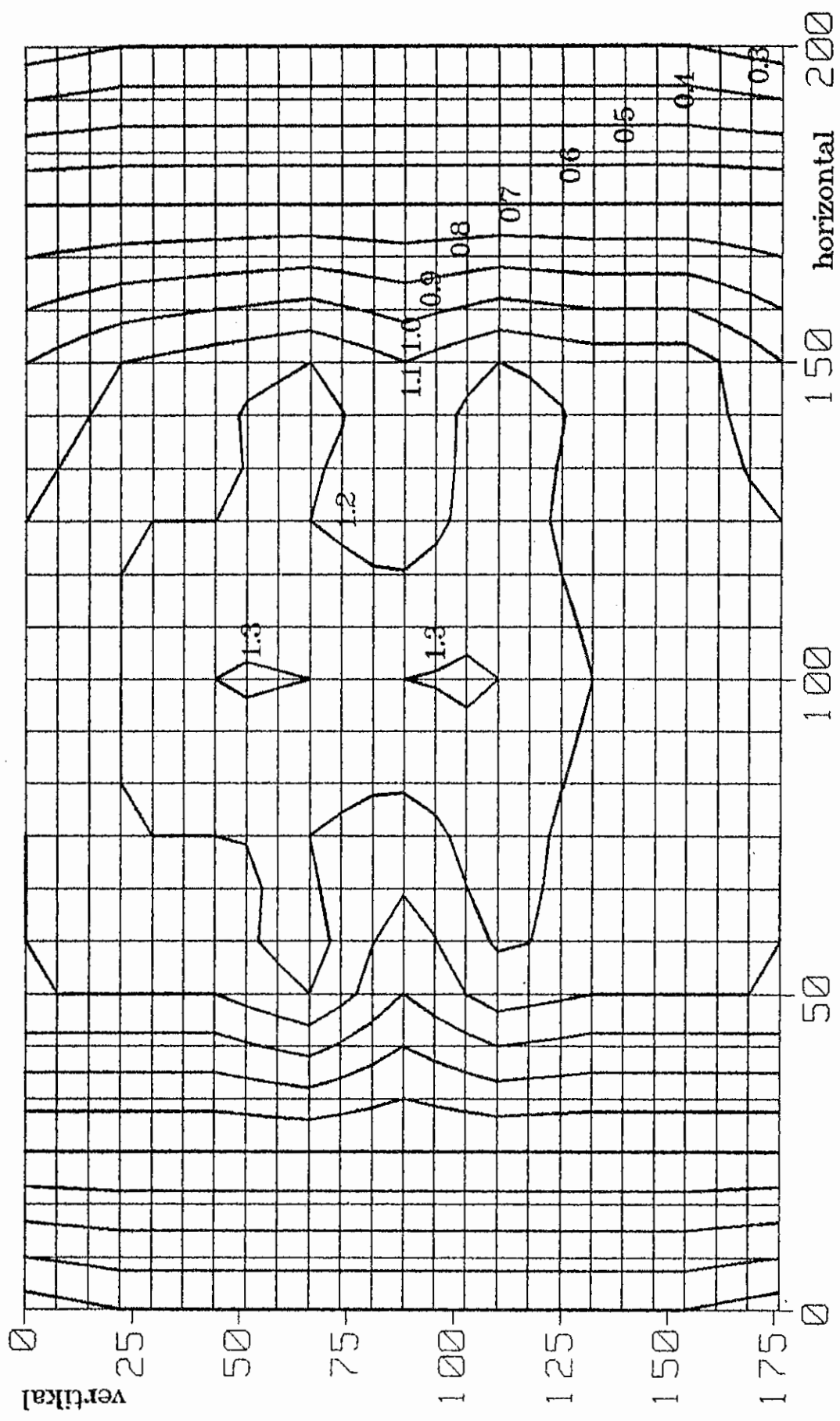


Abb. 1.2.: Strahlungsintensität Ebene 40 – Projektion auf Ebene (w/qcm)

IDF	HORIZONTAL (cm)																									
	0	8	17	25	33	42	50	58	67	75	83	92	100	108	117	125	133	142	150	158	167	175	183	192	200	
	0	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.5	0.4	0.2
	7	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3
	15	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3
	22	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	
	29	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	
	37	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	
	44	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	
	51	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	
	59	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1.0	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	0.9	0.7	0.6	0.4	0.3	
	66	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1.0	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	0.9	0.7	0.6	0.4	0.3	
	73	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	0.9	0.7	0.6	0.4	0.3	
	81	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	
	88	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	
	95	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	
	103	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	
	110	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.0	0.9	0.7	0.6	0.4	0.3	
	117	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	0.9	0.7	0.6	0.4	0.3	
	125	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	0.9	0.7	0.6	0.4	0.3	
	132	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	
	139	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	
	147	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	
	154	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	
	161	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	
	169	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3
	176	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.5	0.4	0.2	

Abb. 1.3: Strahlungsintensität Ebene 40

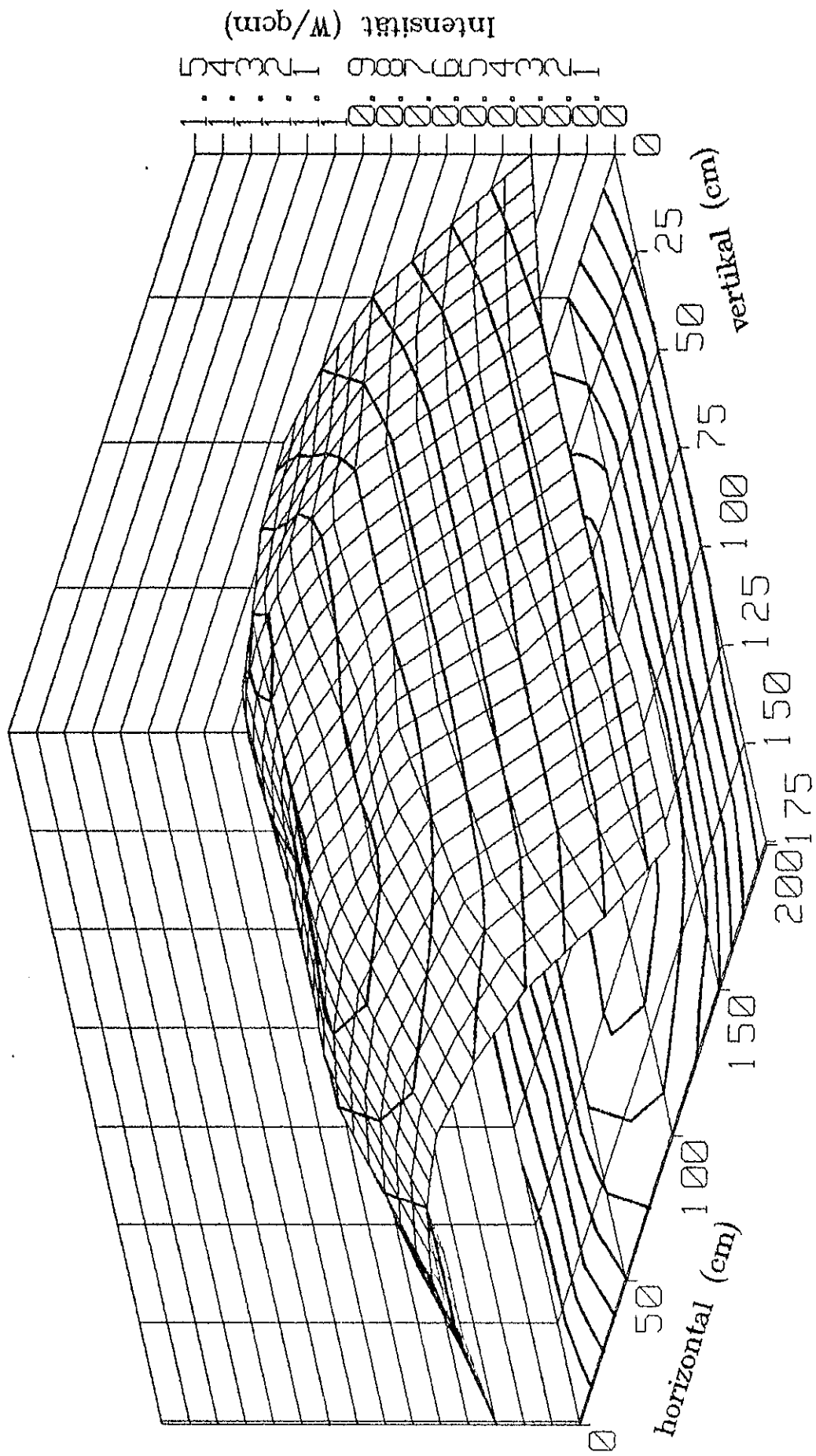


Abb. 2.1.: Strahlungsintensität Ebene 60 - Räumliche Darstellung

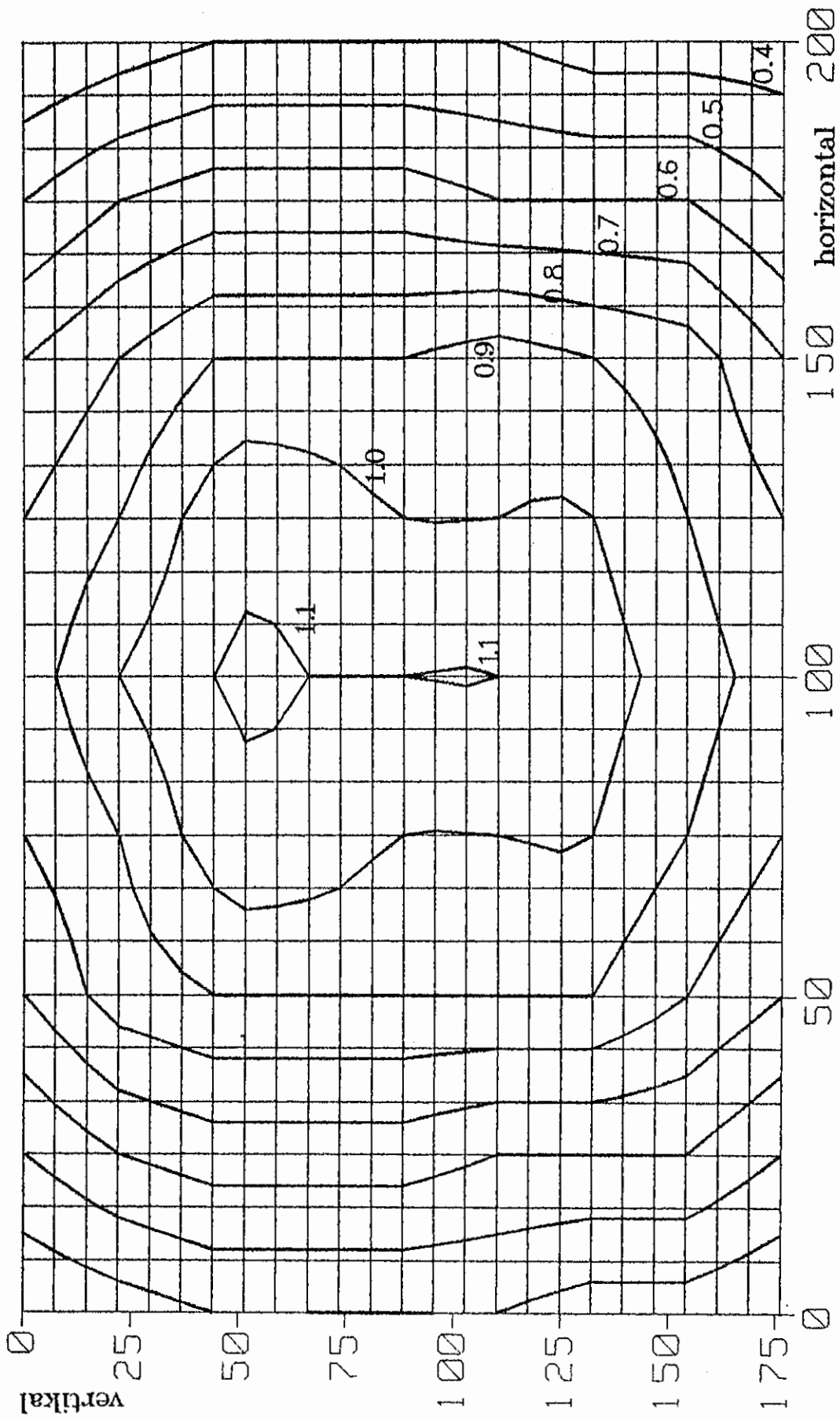


Abb. 2.2.: Strahlungsintensität Ebene 60 – Projektion auf Ebene (w/qcm)

IDF	HORIZONTAL (cm)															VERTIKAL (cm)									
	0	8	17	25	33	42	50	58	67	75	83	92	100	108	117		125	133	142	150	158	167	175	183	192
0	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3
7	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	
15	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.3	
22	0.4	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3		
29	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3			
37	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3			
44	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3			
51	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3			
59	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3			
66	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3			
73	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3			
81	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3			
88	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3			
95	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3			
103	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3			
110	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3			
117	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3			
125	0.4	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3			
132	0.4	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3			
139	0.4	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3			
147	0.4	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3			
154	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3			
161	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3			
169	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3			
176	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3			

Abb. 2.3: Strahlungsintensität Ebene 60

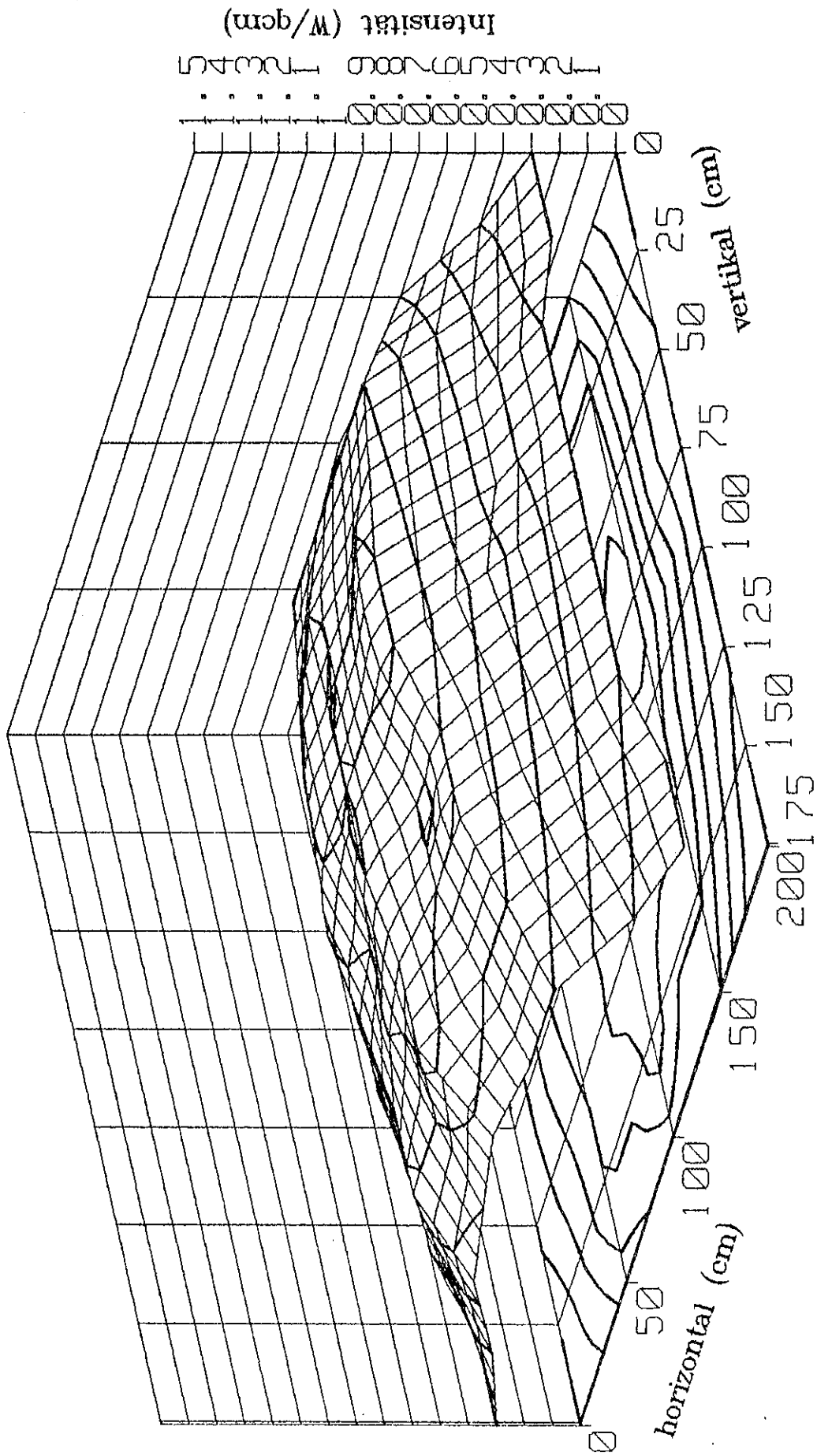


Abb. 3.1.: Strahlungsintensität Ebene 80 - Räumliche Darstellung

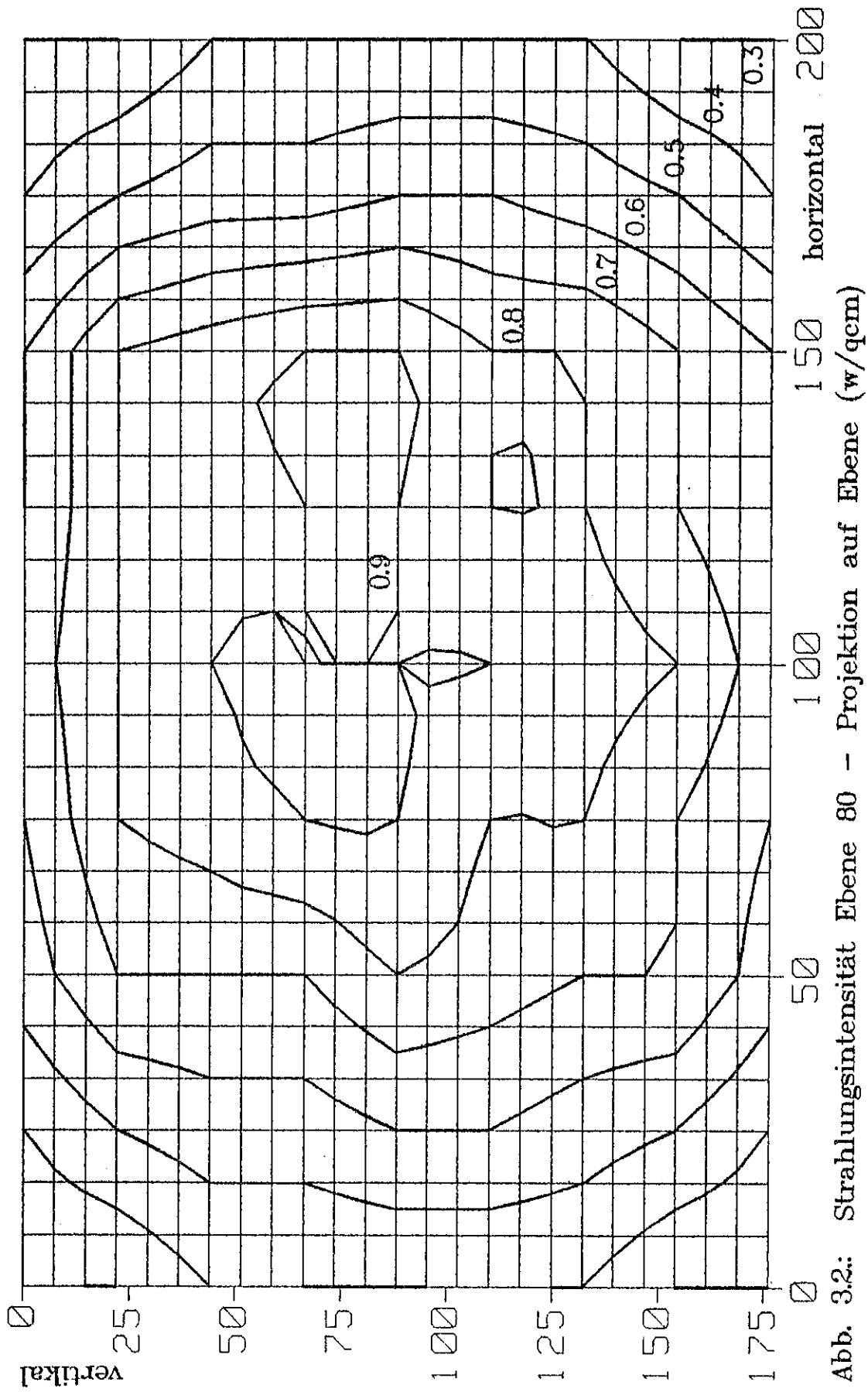


Abb. 3.2.: Strahlungsintensität Ebene 80 – Projektion auf Ebene (w/qcm)

IDF	HORIZONTAL (cm)																									
	0	8	17	25	33	42	50	58	67	75	83	92	100	108	117	125	133	142	150	158	167	175	183	192	200	
	0	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3
	7	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3
	15	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3
	22	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3
	29	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3
	37	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
	44	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
	51	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
	59	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
	66	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
	73	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
	81	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
	88	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
	95	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
	103	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
	110	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4
	117	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4
	125	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4
	132	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4
	139	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4
	147	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3
	154	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3
	161	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3
	169	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3
	176	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3

Abb. 3.3.: Strahlungsintensität Ebene 80

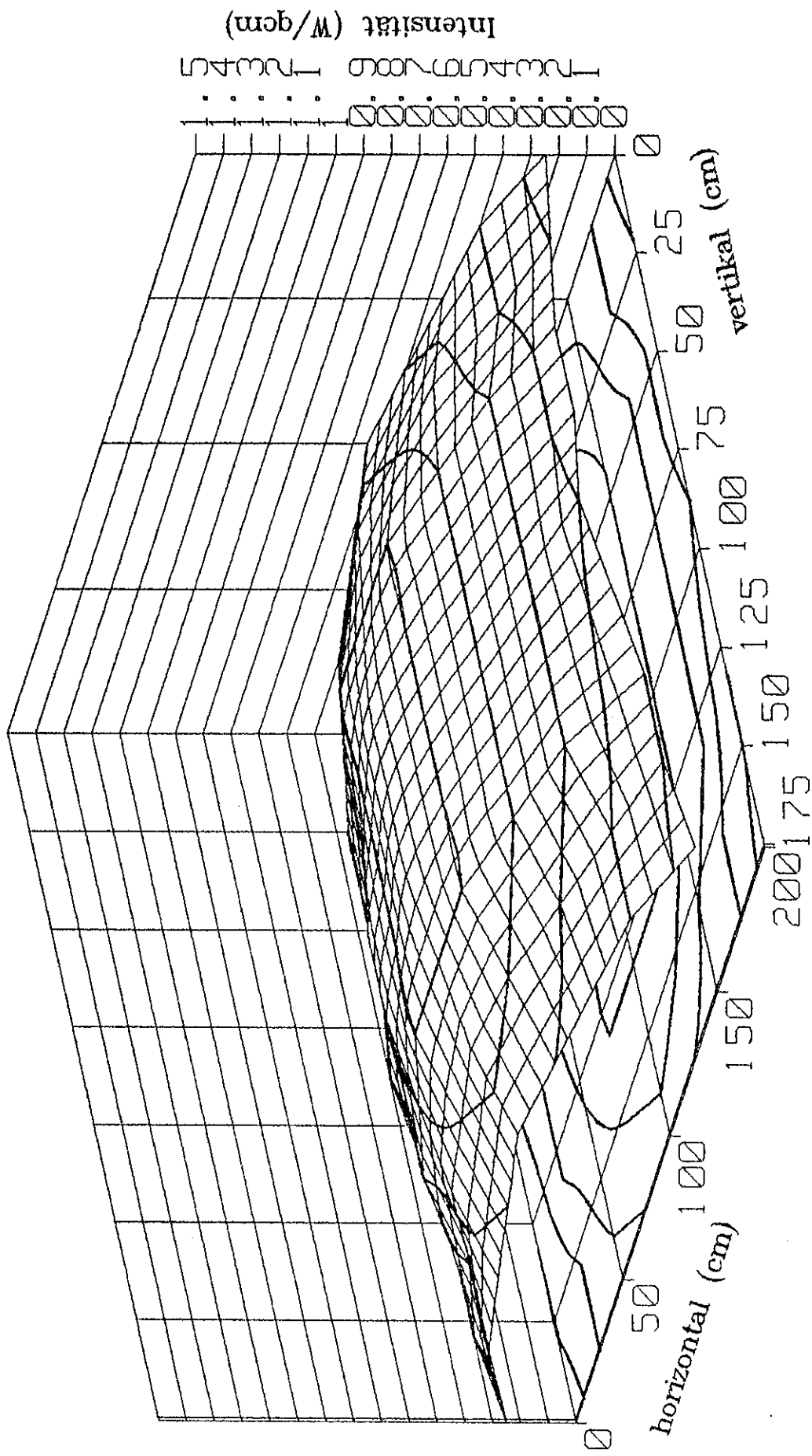


Abb. 4.1.: Strahlungsintensität Ebene 100 - Räumliche Darstellung

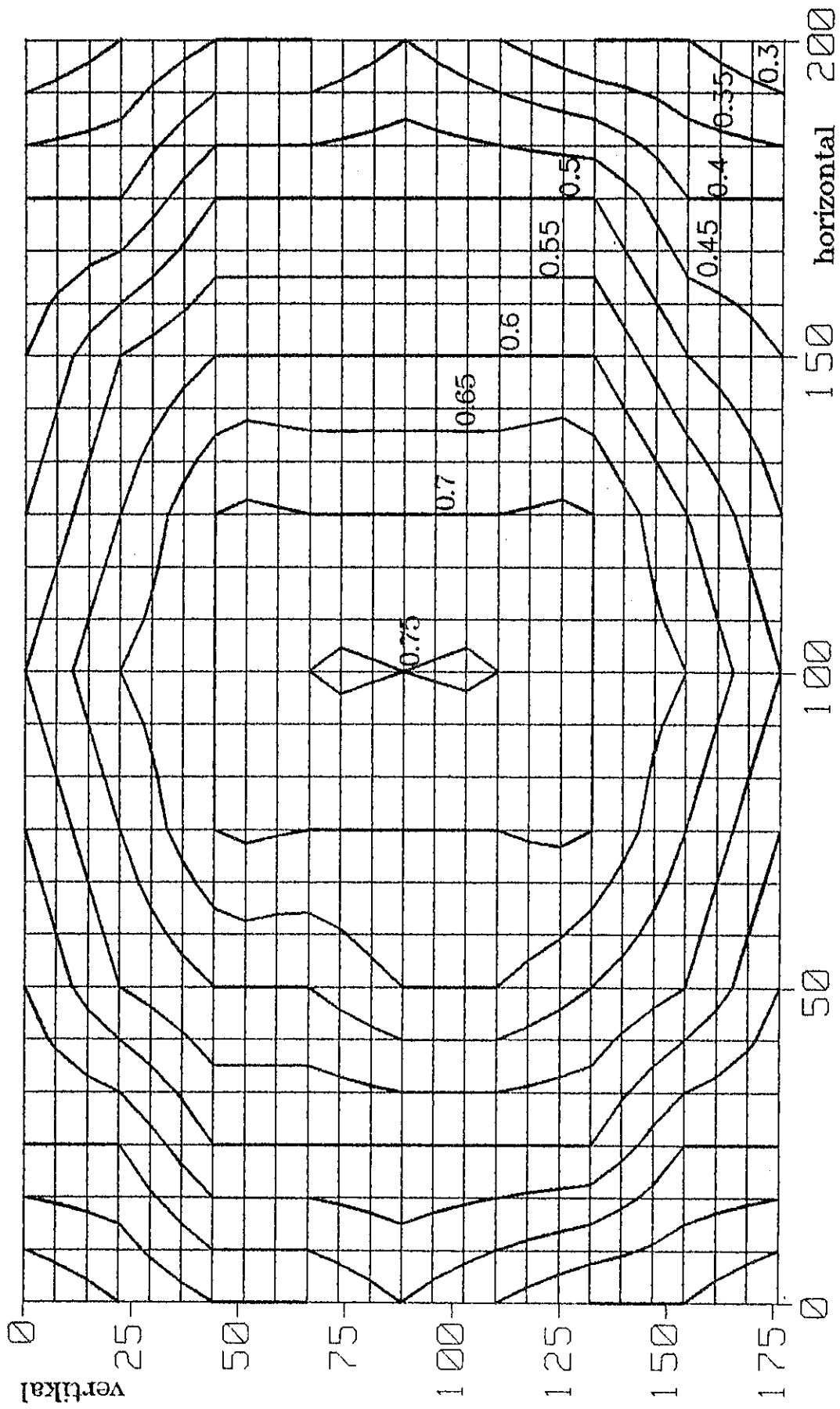


Abb. 4.2.: Strahlungsintensität Ebene 100 -- Projektion auf Ebene (w/qcm)

IDF	HORIZONTAL (cm)																									
	0	8	17	25	33	42	50	58	67	75	83	92	100	108	117	125	133	142	150	158	167	175	183	192	200	
	0	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2
	7	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
	15	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
	22	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
	29	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3
	37	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3
	44	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
	51	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
	59	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
	66	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
	73	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
	81	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
	88	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
	95	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
	103	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
	110	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
	117	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
	125	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
	132	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
	139	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
	147	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
	154	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
	161	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
	169	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
	176	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2

Abb. 4.3.: Strahlungsintensität Ebene 100

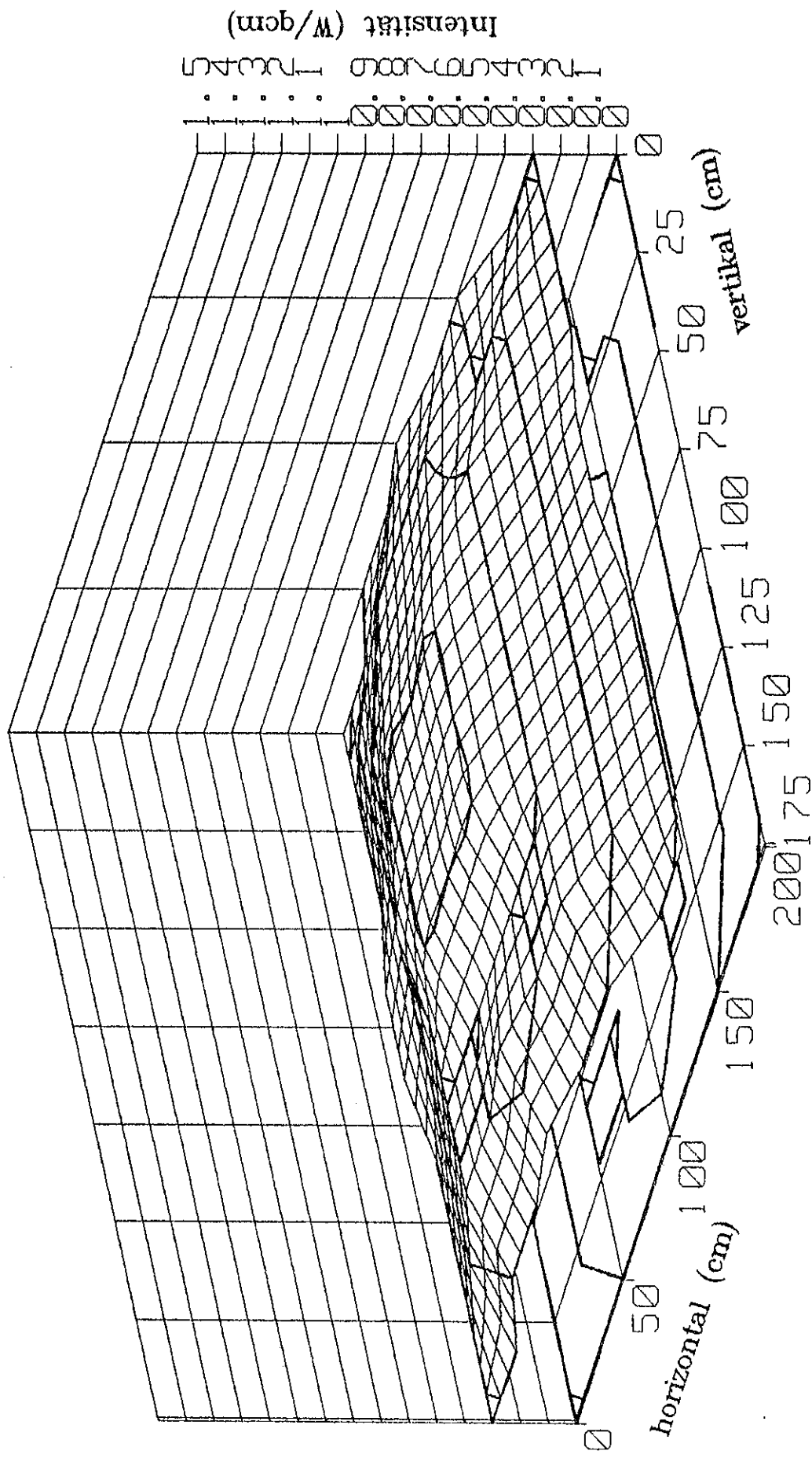


Abb. 5.1.: Strahlungsintensität Ebene 120 - Räumliche Darstellung

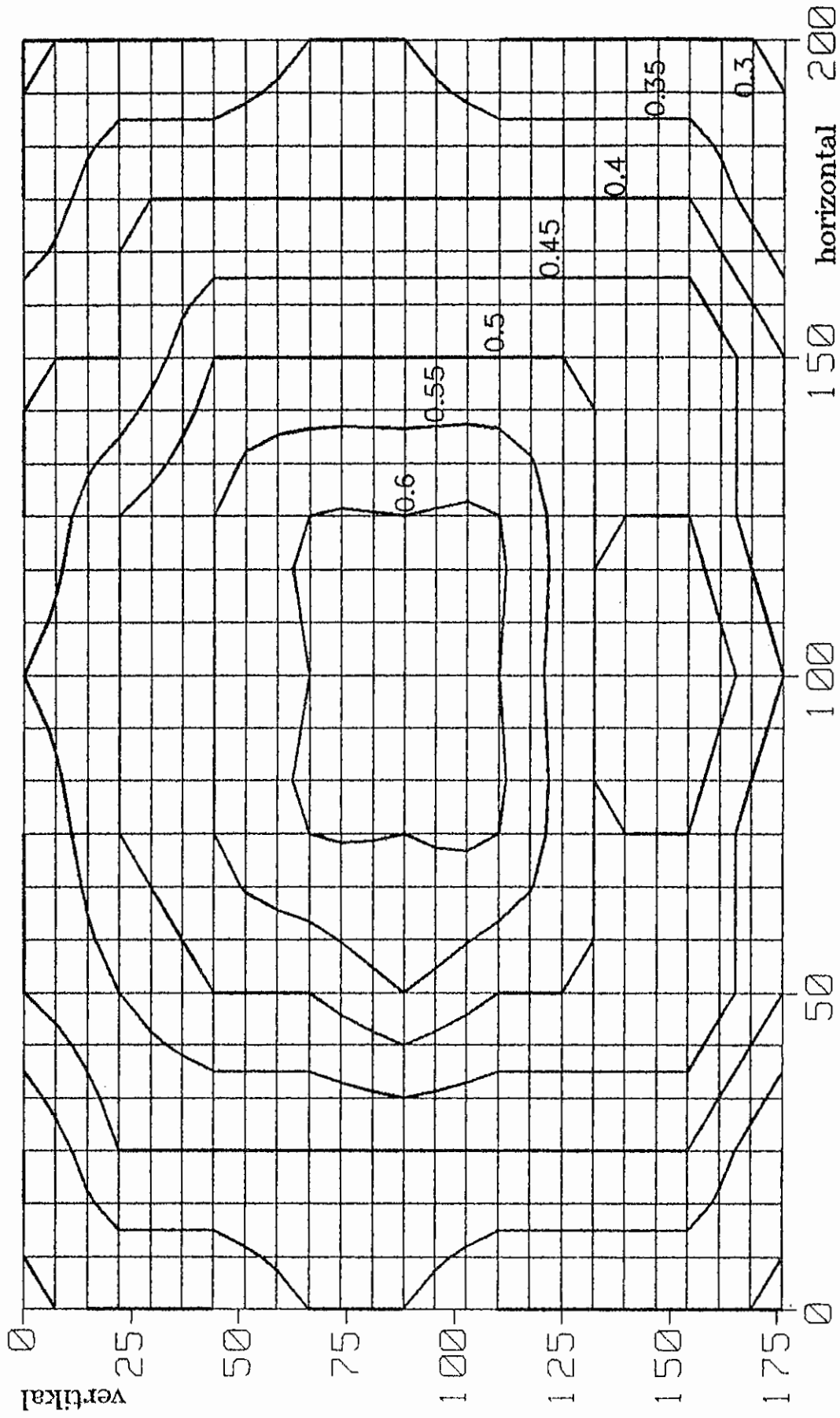


Abb. 5.2.: Strahlungsintensität Ebene 120 - Projektion auf Ebene (w/qcm)

IDF	HORIZONTAL (cm)																									
	0	8	17	25	33	42	50	58	67	75	83	92	100	108	117	125	133	142	150	158	167	175	183	192	200	
	0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	7	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
	15	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	22	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	29	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	37	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	44	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	51	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	59	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	66	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	73	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	81	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	88	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	95	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	103	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	110	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	117	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	125	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	132	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	139	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	147	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	154	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	161	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
	169	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
	176	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

Abb. 5.3.: Strahlungsintensität Ebene 120

ANLAGE 2



Bild 1: Vorderansicht Wärmestrahlerwand

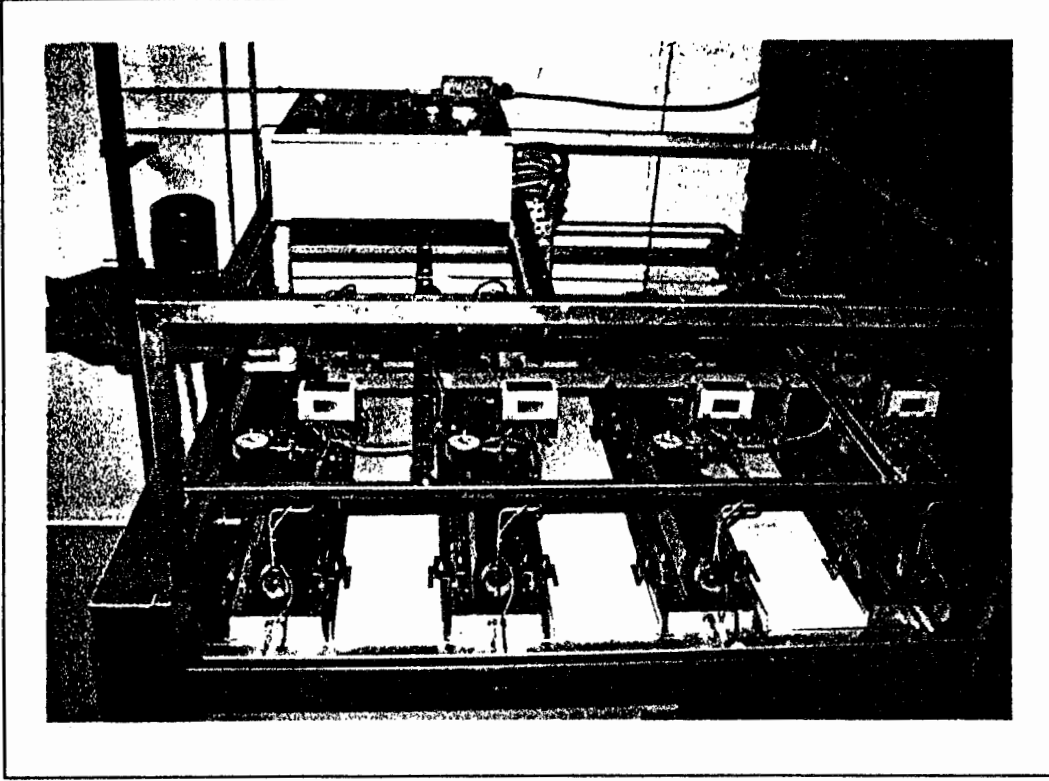


Bild 2: Rückansicht Wärmestrahlerwand mit Bedienelementen

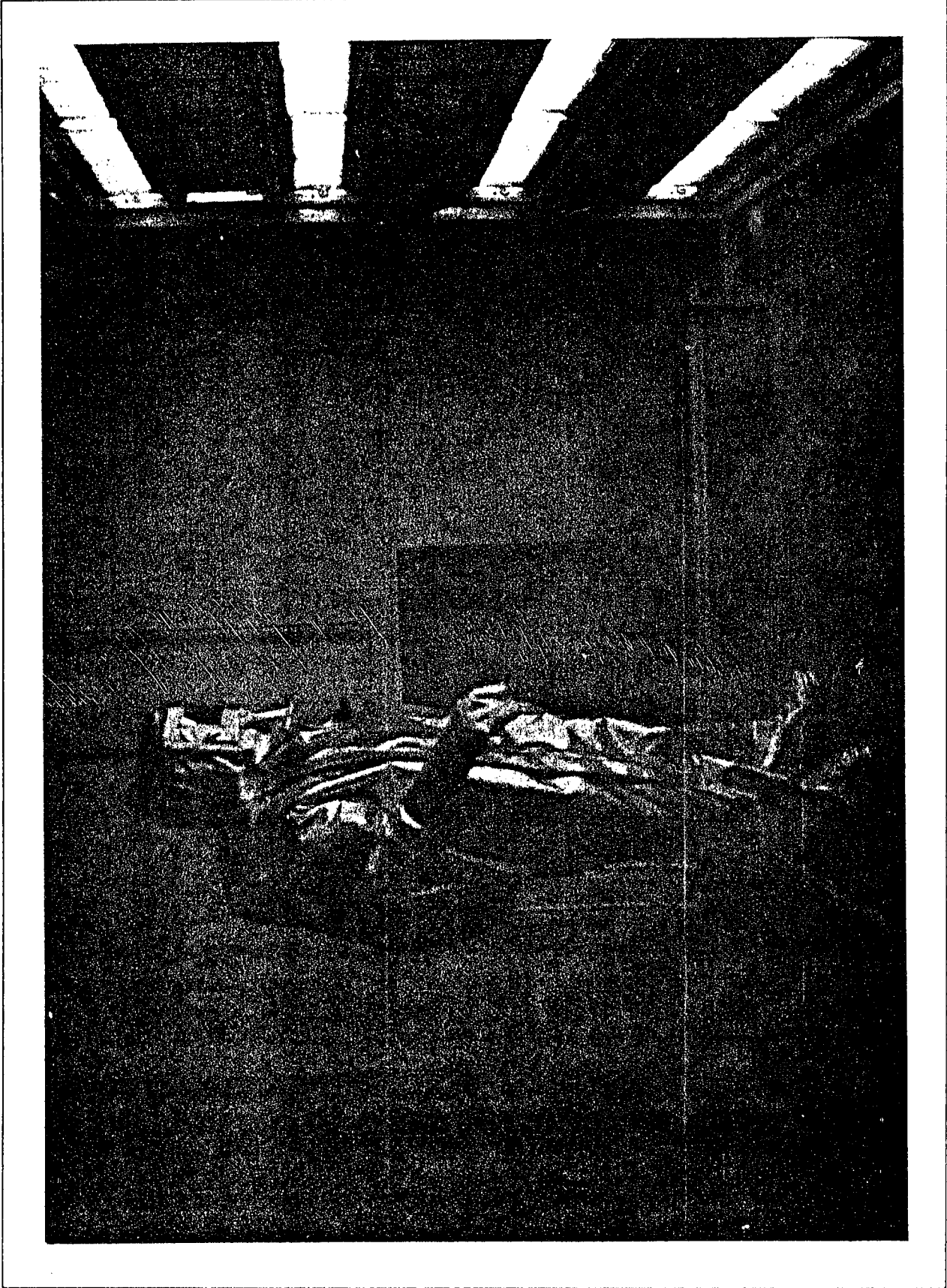
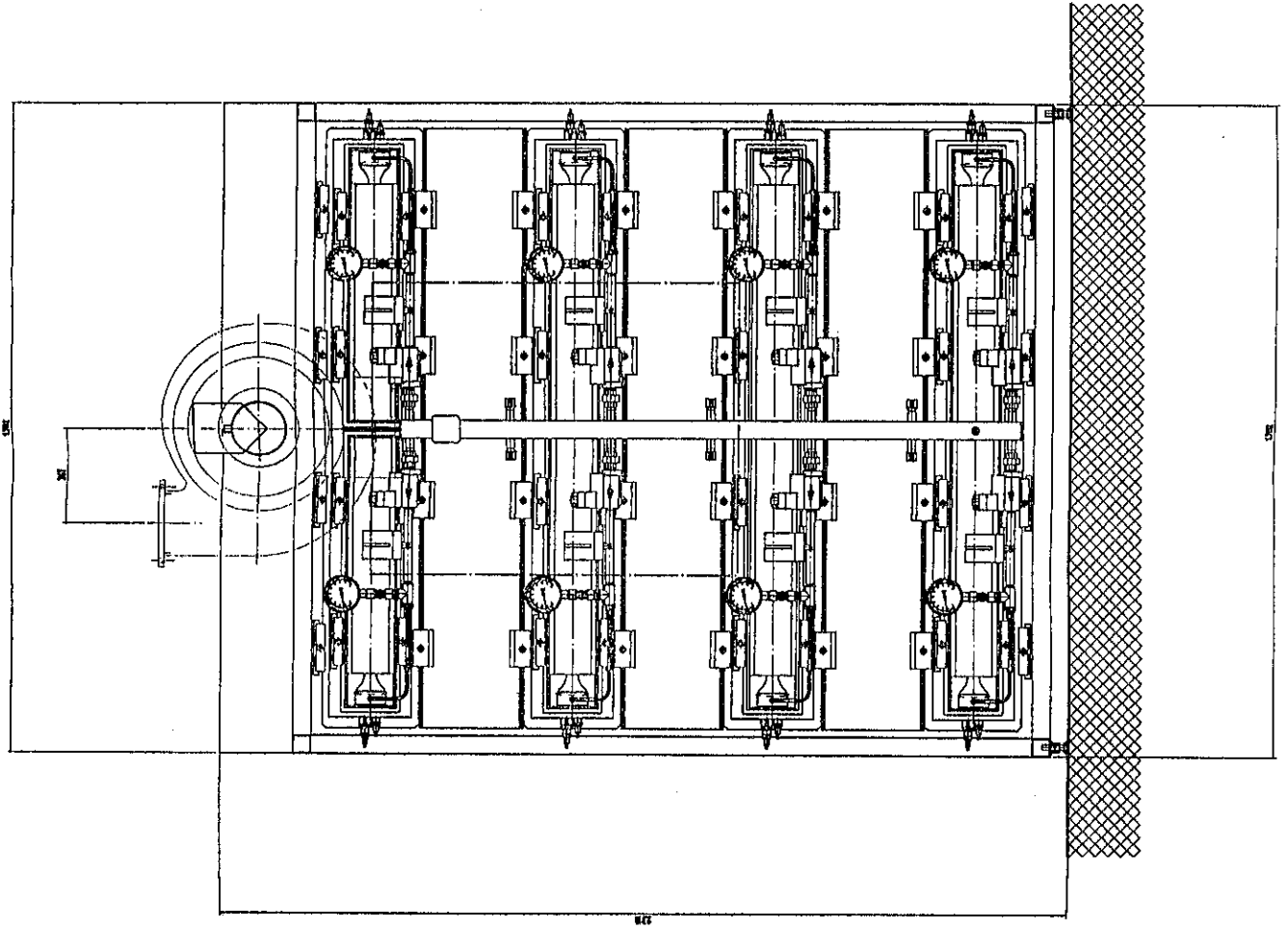
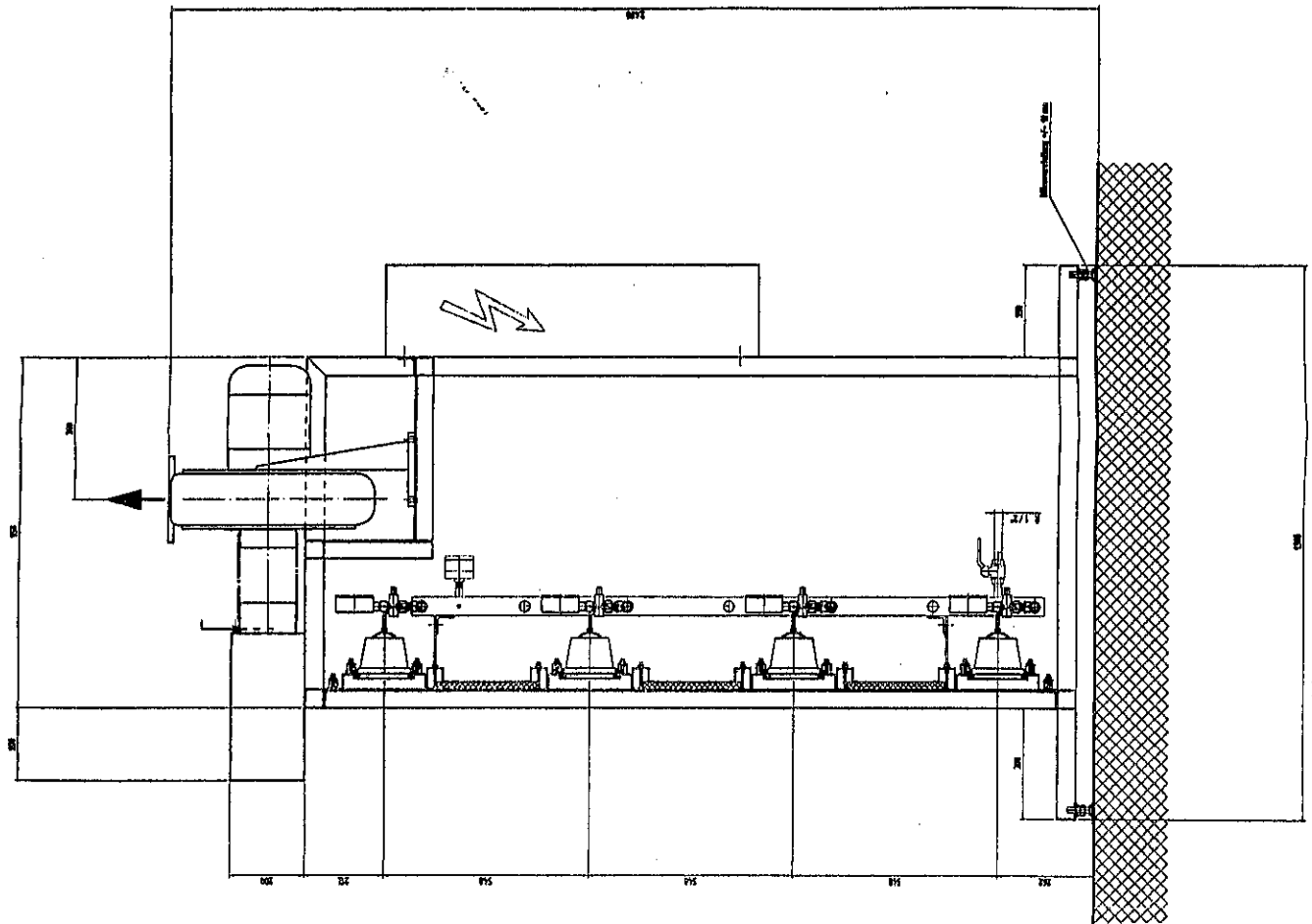


Bild 3: Versuchsaufbau Wärmestrahlschutzanzug vor Wärmestrahlerwand

ANLAGE 3

№	Исполнитель	Проверенный	Дата
1	И.И. Иванов	С.С. Петров	15.05.2010
2	В.В. Сидоров	А.А. Козлов	20.05.2010
3	М.М. Павлов	Д.Д. Соколов	25.05.2010
4	К.К. Морозов	Л.Л. Новиков	30.05.2010
5	Н.Н. Федотов	П.П. Воробьев	05.06.2010
6	С.С. Ефимов	Т.Т. Григорьев	10.06.2010
7	У.У. Иванов	Ф.Ф. Лебедев	15.06.2010
8	Ф.Ф. Петров	Х.Х. Смирнов	20.06.2010
9	Х.Х. Сидоров	Ц.Ц. Макаров	25.06.2010
10	Ц.Ц. Павлов	Ч.Ч. Попов	30.06.2010
11	Ч.Ч. Морозов	Ш.Ш. Степанов	05.07.2010
12	Ш.Ш. Федотов	Щ.Щ. Селезнев	10.07.2010
13	Щ.Щ. Ефимов	Ъ.Ъ. Зайцев	15.07.2010
14	Ъ.Ъ. Иванов	Ы.Ы. Меркулов	20.07.2010
15	Ы.Ы. Петров	Ь.Ь. Павлов	25.07.2010
16	Ь.Ь. Сидоров	Э.Э. Соколов	30.07.2010
17	Э.Э. Морозов	Ю.Ю. Макаров	05.08.2010
18	Ю.Ю. Федотов	Я.Я. Попов	10.08.2010
19	Я.Я. Ефимов	З.З. Степанов	15.08.2010
20	З.З. Иванов	И.И. Селезнев	20.08.2010
21	И.И. Петров	О.О. Зайцев	25.08.2010
22	О.О. Сидоров	П.П. Меркулов	30.08.2010
23	П.П. Морозов	К.К. Павлов	05.09.2010
24	К.К. Федотов	Г.Г. Соколов	10.09.2010
25	Г.Г. Ефимов	Д.Д. Макаров	15.09.2010
26	Д.Д. Иванов	С.С. Попов	20.09.2010
27	С.С. Петров	Т.Т. Степанов	25.09.2010
28	Т.Т. Сидоров	Л.Л. Селезнев	30.09.2010
29	Л.Л. Морозов	В.В. Зайцев	05.10.2010
30	В.В. Федотов	А.А. Меркулов	10.10.2010
31	А.А. Ефимов	И.И. Павлов	15.10.2010
32	И.И. Иванов	О.О. Соколов	20.10.2010
33	О.О. Петров	П.П. Макаров	25.10.2010
34	П.П. Сидоров	К.К. Попов	30.10.2010
35	К.К. Морозов	Г.Г. Степанов	05.11.2010
36	Г.Г. Федотов	Д.Д. Селезнев	10.11.2010
37	Д.Д. Ефимов	Т.Т. Зайцев	15.11.2010
38	Т.Т. Иванов	Л.Л. Меркулов	20.11.2010
39	Л.Л. Петров	В.В. Павлов	25.11.2010
40	В.В. Сидоров	А.А. Соколов	30.11.2010
41	А.А. Морозов	И.И. Макаров	05.12.2010
42	И.И. Федотов	О.О. Попов	10.12.2010
43	О.О. Ефимов	П.П. Степанов	15.12.2010
44	П.П. Иванов	К.К. Селезнев	20.12.2010
45	К.К. Петров	Г.Г. Зайцев	25.12.2010
46	Г.Г. Сидоров	Д.Д. Меркулов	30.12.2010
47	Д.Д. Морозов	Т.Т. Павлов	05.01.2011
48	Т.Т. Федотов	Л.Л. Соколов	10.01.2011
49	Л.Л. Ефимов	В.В. Макаров	15.01.2011
50	В.В. Иванов	А.А. Попов	20.01.2011
51	А.А. Петров	И.И. Степанов	25.01.2011
52	И.И. Сидоров	О.О. Селезнев	30.01.2011
53	О.О. Морозов	П.П. Зайцев	05.02.2011
54	П.П. Федотов	К.К. Меркулов	10.02.2011
55	К.К. Ефимов	Г.Г. Павлов	15.02.2011
56	Г.Г. Иванов	Д.Д. Соколов	20.02.2011
57	Д.Д. Петров	Т.Т. Макаров	25.02.2011
58	Т.Т. Сидоров	Л.Л. Попов	30.02.2011
59	Л.Л. Морозов	В.В. Степанов	05.03.2011
60	В.В. Федотов	А.А. Селезнев	10.03.2011
61	А.А. Ефимов	И.И. Зайцев	15.03.2011
62	И.И. Иванов	О.О. Меркулов	20.03.2011
63	О.О. Петров	П.П. Павлов	25.03.2011
64	П.П. Сидоров	К.К. Соколов	30.03.2011
65	К.К. Морозов	Г.Г. Макаров	05.04.2011
66	Г.Г. Федотов	Д.Д. Попов	10.04.2011
67	Д.Д. Ефимов	Т.Т. Степанов	15.04.2011
68	Т.Т. Иванов	Л.Л. Селезнев	20.04.2011
69	Л.Л. Петров	В.В. Зайцев	25.04.2011
70	В.В. Сидоров	А.А. Меркулов	30.04.2011
71	А.А. Морозов	И.И. Павлов	05.05.2011
72	И.И. Федотов	О.О. Соколов	10.05.2011
73	О.О. Ефимов	П.П. Макаров	15.05.2011
74	П.П. Иванов	К.К. Попов	20.05.2011
75	К.К. Петров	Г.Г. Степанов	25.05.2011
76	Г.Г. Сидоров	Д.Д. Селезнев	30.05.2011
77	Д.Д. Морозов	Т.Т. Зайцев	05.06.2011
78	Т.Т. Федотов	Л.Л. Меркулов	10.06.2011
79	Л.Л. Ефимов	В.В. Павлов	15.06.2011
80	В.В. Иванов	А.А. Соколов	20.06.2011
81	А.А. Петров	И.И. Макаров	25.06.2011
82	И.И. Сидоров	О.О. Попов	30.06.2011
83	О.О. Морозов	П.П. Степанов	05.07.2011
84	П.П. Федотов	К.К. Селезнев	10.07.2011
85	К.К. Ефимов	Г.Г. Зайцев	15.07.2011
86	Г.Г. Иванов	Д.Д. Меркулов	20.07.2011
87	Д.Д. Петров	Т.Т. Павлов	25.07.2011
88	Т.Т. Сидоров	Л.Л. Соколов	30.07.2011
89	Л.Л. Морозов	В.В. Макаров	05.08.2011
90	В.В. Федотов	А.А. Попов	10.08.2011
91	А.А. Ефимов	И.И. Степанов	15.08.2011
92	И.И. Иванов	О.О. Селезнев	20.08.2011
93	О.О. Петров	П.П. Зайцев	25.08.2011
94	П.П. Сидоров	К.К. Меркулов	30.08.2011
95	К.К. Морозов	Г.Г. Павлов	05.09.2011
96	Г.Г. Федотов	Д.Д. Соколов	10.09.2011
97	Д.Д. Ефимов	Т.Т. Макаров	15.09.2011
98	Т.Т. Иванов	Л.Л. Попов	20.09.2011
99	Л.Л. Петров	В.В. Степанов	25.09.2011
100	В.В. Сидоров	А.А. Селезнев	30.09.2011



Technische Beschreibung der Propangas - Wärmestrahlerwand

Die Strahlerwand ist mit 4 Strahlerpaaren 814 ausgerüstet.

Die Strahler sind paarweise von oben nach unten einschaltbar.

Jedes Strahlerpaar ist von 50 - 100% regelbar.

Eine Brennerluftversorgung mit einem Ventilator ist nicht erforderlich, da es sich um Injektorbrennkammern handelt.

Die Strahlerwand besteht aus einem Profilstahlrahmen aus verwindungssteifen Hohl- und Stahlprofilen.

Höhe: ca. 2.000 mm

Breite: ca. 1.800 mm

Für den sicheren Stand der Strahlerwand sorgt eine Fußkonstruktion von ca. 1.300 mm Länge. Die Strahler (Typ 814) sind paarweise (nebeneinander) in der Strahlerwand befestigt.

Es sind 4 Strahlerpaare übereinander angeordnet. Sie sind unabhängig voneinander zu- und abschaltbar. Jedes Strahlerpaar ist zwischen 50 und 100% regelbar.

Der Gesamtanschlußwert beträgt: 120.000 kcal/h
ca. 140 kW

Gasart: Propan

Gasverbrauch max. Leistung: ca. 10,8 kg/h
min. Leistung: ca. 5,5 kg/h

Gasdruck: 90 - 40 mbar

Elektrischer Anschlußwert: 1,7 kW

Spannung: 220 / 380 V, 50 Hz

Zwischen den Gas-IR-Strahlern befinden sich hitzebeständige Isolierplatten. Diese Platten verhindern eine Wärmerückstrahlung.

Die Gasversorgung einschließlich der Gasregelarmaturen befindet sich komplett verrohrt an der Rückseite der Strahlerwand.

Der Abluftventilator ist auf dem Abgaskasten am oberen Ende der Wand angeordnet. Der Abgasstrom von max. 2.400 m³/h kann über einen Schieber eingestellt werden.

An der Rückseite der Strahlerwand ist der Schaltkasten mit den 4 RK 80 (Strahlerregelung 50 - 100%) angebracht. Die Ansteuerung des Abluftventilators befindet sich ebenfalls in diesem Schaltkasten.

Quelle: Leistungsbeschreibung Wärmestrahlerwand