

# AGF

BERICHTE

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

Modellversuche zur Untersuchung des Brand-  
verhaltens wasserberieselter Textilvorhänge bei Bränden

# 19

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER LANDESDIENSTSTELLEN  
FÜR FEUERSCHUTZ IN DEN BUNDESLÄNDERN (AGF)

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

AGF

Forschungsbericht Nr. 19

"Modellversuche zur Untersuchung des Brand-  
verhaltens wasserberieselter Textilvorhänge  
bei Bränden"

von

Dipl.-Ing. R. John

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

Mai 1971

## INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	1
2.	GRUNDLAGEN DER WÄRMEÜBERTRAGUNG	2
2.1.	Wärmeleitung	2
2.2.	Konvektion	3
2.3.	Wärmestrahlung	3
2.3.1.	Vom wärmeren Körper abgestrahlter Wärmestrom	4
2.3.2.	Auf einem bestrahlten Körper auftreffender Wärmestrom	5
2.3.3.	Vom bestrahlten Festkörper absorbiertes Anteil	5
2.3.4.	Ausgetauschter Wärmestrom	6
3.	WÄRMEBELASTUNG VON BRANDMAUERN	7
3.1.	Durch Leitung übertragener Wärmestrom	7
3.2.	Durch Konvektion übertragener Wärmestrom	8
3.3.	Durch Strahlung übertragener Wärmestrom	9
3.4.	Vergleich der Wärmeströme, die durch Konvektion bzw. durch Strahlung an die Trennwand übertragen werden	10
4.	ABFÜHRUNG DER ÜBERTRAGENEN WÄRME DURCH WASSERBERIESELUNG	11
4.1.	Wärmeübertragung an wasserberieselte Trennwände	11
4.1.1.	Wärmeübergang durch Strahlung an eine wasserberieselte Trennwand	12
4.2.	Erforderliche Wassermenge zum Abführen der eingestrahlten Wärme	13

4.2.1.	Trennwand absorbiert vollständig	14
4.2.2.	Trennwand reflektiert vollständig	15
4.2.3.	Die Trennwand ist für die Strahlung vollkommen durchlässig	15
4.3.	Einfluß des Wasserdampfes auf die Wärmeeinstrahlung	16
5.	FILMDICKE UND WASSERMENGE AN BERIESELTEN WÄNDEN	17
6.	VERSUCHE ZUR ERMITTLUNG DER ERFORDERLICHEN BERIESELUNGSDICHTE	18
6.1.	Versuchsaufbau	18
6.2.	Versuchsdurchführung	20
6.3.	Versuchsauswertung	21
6.3.1.	Zugeführter Wasserstrom und Wasserverteilung	21
6.3.2.	Erforderliche Berieselungsdichte zum Kühlen des Vorhanges	24
7.	ÜBERTRAGUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE AUF GROSSE VORHÄNGE	26
7.1.	Erforderliche Berieselungsdichte für große Vorhänge	26
7.2.	Berieselung des Vorhanges auf verschiedenen Seiten	27
8.	FOLGERUNGEN	27
9.	ZUSAMMENFASSUNG	29
10.	LITERATURVERZEICHNIS	31
11.	TABELLEN	33
12.	BILDER	36

## 1. EINLEITUNG

Die Automation technologischer Fertigungsprozesse erfordert in zunehmendem Maße immer größere, nicht unterteilte Fabrikationshallen. Auch die Rationalisierung des Transportes sowie der Lagerung von Rohstoffen und Fertigprodukten kann nur in weitläufigen, nicht unterteilten Lagerhallen erfolgen. Bei vorhandenen Brandmauern sind größere Öffnungen für den Durchlaß von Transportmitteln wie Förderbänder, Gabelstapler und ähnlichem erforderlich. Diese technische Entwicklung stellt den vorbeugenden Brandschutz vor eine schwierige Aufgabe.

Einen Versuch, diese Aufgabe zu lösen, stellen Regenwände oder Wasserschleier dar. Diese sollen in einem Brandfall eine Ausweitung des Feuers durch Strahlung, Konvektion und Flugfeuer auf die übrigen Hallenteile verhindern. Die vorliegenden Untersuchungen [1], [2] über derartige Anlagen zeigen aber, daß im Mittel die Strahlungswärme durch einen Wasserschleier nur um ca. 20 % abgeschwächt werden kann.

Zur Verbesserung der abschirmenden Wirkung von Wärme und Flugfeuer sowie auch von Qualm und giftigen Gasen wurden wasserberieselte Textilvorhänge vorgeschlagen. Der Großversuch [3] in einer Halle von 21 x 12 m Grundfläche und 8 m Höhe hat die wesentlich bessere Schutzwirkung von berieselten Glasfaservorhängen gegenüber Wasserschleieranlagen gezeigt. Diese Versuche ergaben, daß nur etwa 2 bis 3 % der auf den Vorhang eingestrahlt Wärme an den dahinterliegenden Raum abgestrahlt wurde. Wesentlich für die Zuverlässigkeit dieser Vorhänge ist jedoch die Berieselungsstärke. Durch die Berieselung muß die gesamte durch Bestrahlung und Konvektion an den Vorhang abge-

gebene Wärme abgeführt werden, damit die Temperatur des Vorhanges nicht zu hoch ansteigt. Der Ermittlung der erforderlichen Berieselungsdichten dienen die folgenden Untersuchungen.

## 2. GRUNDLAGEN DER WÄRMEÜBERTRAGUNG

Die Aufgabe von Brandmauern sowie von entsprechenden Einrichtungen besteht darin, ein Übergreifen von Bränden auf angrenzende Gebäude bzw. Gebäudeteile zu verhindern. Dies wird in erster Linie dadurch erreicht, daß eine Übertragung der Wärme auf die hinter der Brandmauer oder entsprechenden Einrichtungen liegenden brennbaren Teilen ausgeschlossen wird.

Von einer wärmeren Stelle, in diesem Fall Flammen und Rauchgase eines brennenden Stoffes, wird Wärme durch Leitung, Konvektion und Strahlung an eine kältere Stelle, die Brandmauer, übertragen.

### 2.1. Wärmeleitung

Bei der Wärmeleitung erfolgt der Wärmetransport durch eine Fortpflanzung innerhalb eines Stoffes. Hierbei geht die Wärme von einem Stoffteilchen auf das benachbarte über, ohne daß die Stoffteilchen ihre Lage ändern. Der übertragene Wärmestrom kann für eine ebene Wand nach der Gleichung

$$\dot{Q}_L = \frac{\lambda}{d} \cdot F \cdot t \quad (1)$$

berechnet werden.

Hierin ist:

- $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit,
- $d$  die Dicke der Wand,
- $F$  die Fläche der Wand und
- $\Delta t$  die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Oberflächen der Wand.

## 2.2. Konvektion

Bei der Konvektion wird die Wärme durch die sich gegeneinander bewegenden Stoffteilchen, z.B. in bewegten Flüssigkeiten oder Gasen, von einer wärmeren Stelle an eine kältere Stelle übertragen. Hierbei unterscheidet man, ob sich die Stoffteilchen frei bewegen können oder ob eine erzwungene Strömung vorliegt. Der Wärmestrom von einer bewegten Flüssigkeit oder einem Gas mit der Temperatur  $t_g$  an eine feste Wand von der Fläche  $F$  und der Temperatur  $t_w$  kann nach der Gleichung

$$\dot{Q}_K = \alpha \cdot F (t_g - t_w) \quad (2)$$

berechnet werden.  $\alpha$  ist die Wärmeübergangszahl zwischen den Rauchgasen und der Wand.

Durch Wärmeleitung sowie durch Konvektion kann also nur Wärme übertragen werden, wenn ein Medium zwischen den wärmeaustauschenden Stellen vorhanden ist.

## 2.3. Wärmestrahlung

Der Wärmeaustausch durch Strahlung ist an kein Medium zum Austausch der Wärme gebunden. Im allgemeinen besteht daher zwischen allen Körpern ein Wärmeaustausch durch

Strahlung. Maßgebend dafür, ob ein Körper mehr Wärme durch Strahlung aufnimmt als er selbst durch Strahlung abgibt, ist seine Temperatur im Vergleich zu der seiner Umgebung. Bei der Strahlung muß man drei voneinander unabhängige Faktoren berücksichtigen, wenn man die ausgetauschte Wärmemenge ermitteln will.

Der wärmere Körper strahlt entsprechend seiner Temperatur und der Oberflächenbeschaffenheit einen bestimmten Wärmestrom ab. Ein Teil dieses Wärmestromes trifft auf einen zweiten Körper. Diese auftreffende Wärmestrahlung wird je nach der Art und Beschaffenheit des zweiten Körpers von diesen jeweils vollständig absorbiert, reflektiert oder durchgelassen oder nur teilweise absorbiert, reflektiert und durchgelassen.

Zur Berechnung der durch Strahlung ausgetauschten Wärme sind bei einer Vernachlässigung der Eigenstrahlung des bestrahlten Körpers folgende Werte erforderlich:

1. Abgestrahlter Wärmestrom,
2. auf den zweiten Körper auftreffende Anteil,
3. vom zweiten Körper absorbiertes Anteil.

### 2.3.1. Vom wärmeren Körper abgestrahlter Wärmestrom

Von einem wärmeren Körper mit der Fläche  $F_1$  wird der Wärmestrom

$$\dot{Q}_{1ab} = C_S \cdot \epsilon_1 \cdot F_1 \left[ \frac{T_1}{100} \right]^4 \quad (3)$$

an die Umgebung abgestrahlt.

Hierin ist:

$C_S$  die Strahlungszahl des absolut schwarzen Körpers



$\epsilon_1$  die Emmissionszahl und  
 $T_1$  die absolute Temperatur der  
Oberfläche des strahlenden Körpers.

Unter der Voraussetzung, daß das Lambert'sche Cosinus Gesetz gilt, wird dieser Wärmestrom gleichmäßig nach allen Richtungen in den Raum abgestrahlt. Obwohl für viele strahlende Flächen dieses Gesetz nur annähernd erfüllt ist, wird bei den folgenden Betrachtungen von der strengen Gültigkeit dieser Gesetzmäßigkeit ausgegangen.

### 2.3.2. Auf einen bestrahlten Körper auftreffender Wärmestrom

Das Verhältnis des auf den zweiten Körper auftreffenden Strahlungsanteiles zur gesamten abgestrahlten Wärme wird durch das Winkelverhältnis  $\varphi$  ausgedrückt. Für einige besondere Zuordnungen von strahlender zur bestrahlten Fläche können die Winkelverhältnisse aus [4] entnommen werden. Die auf den zweiten Körper auftreffende Wärmestrahlung ist damit

$$\dot{Q}_{2\text{auf}} = \varphi_1 \cdot C_s \cdot \epsilon_1 \cdot F_1 \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 \quad (4)$$

### 2.3.3. Vom bestrahlten Festkörper absorbiertes Anteil

Mit Ausnahme von durchscheinenden festen Materialien, wie Glas, Kunststoffe und anderen, wird der absorbierte Strahlungsanteil nur durch das Reflexionsvermögen des bestrahlten Körpers im Bereich der Wärmestrahlung beeinflusst. Der absorbierte Anteil liegt bei 100 % für den schwarzen Körper und kann bis auf einige Prozent bei spiegelnden Metalloberflächen absinken. Da das Ab-

sorptionsvermögen gleich dem Emissionsvermögen ist, wird das Verhältnis der absorbierten zur auffallenden Strahlung durch die Emissionszahl  $\epsilon_2$  angegeben.

Nach der Gleichung:

$$\dot{Q}_{2abs} = \epsilon_2 \cdot \varphi_1 \cdot C_S \cdot \epsilon_1 \cdot F_1 \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 \quad (5)$$

kann nun der vom zweiten Körper absorbierten Wärmestrom  $\dot{Q}_{2abs}$  berechnet werden. Aus der Gleichung (5) sieht man nun sehr deutlich, daß trotz gleicher Temperatur  $T_1$  des Strahlers der von einem zweiten Körper durch Strahlung aufgenommener Wärmestrom durch die drei unabhängigen Faktoren  $\varphi_1$ ,  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$  beeinflusst wird. Bleibt die Lage der beiden Körper im Raum sowie ihre Form während des Strahlungsaustausches erhalten, so bleibt auch der Wert von  $\varphi_1$  konstant.  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$  können sich jedoch während der Bestrahlungsdauer stark verändern. Bei spiegelnden Oberflächen zum Beispiel kann die Emissionszahl durch Verschmutzung oder Oxidation wesentlich ansteigen. Eine polierte Kupferoberfläche z.B. hat bei 20°C eine Emissionszahl von  $\epsilon = 0,030$ . Oxidiert diese Fläche im Lauf der Zeit, so steigt  $\epsilon$  auf 0,76 bei 120°C an [4].

#### 2.3.4. Ausgetauschter Wärmestrom

Da der bestrahlte Körper mit der Temperatur  $T_2$ , der Fläche  $F_2$  und der Emissionszahl  $\epsilon_2$  selbst Wärme nach der Gleichung

$$\dot{Q}_{2ab} = C_S \cdot \epsilon_2 \cdot F_2 \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \quad (6)$$

in den Raum abstrahlt, ergibt sich die effektive Wärmezufuhr  $\dot{Q}_{2zugef}$  aus der Differenz der Gleichungen (5) und (6) zu:

$$Q_{2\text{zugef}} = C_S \cdot \epsilon_2 \left[ \varphi_1 \cdot \epsilon_1 \cdot F_1 \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - F_2 \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (7)$$

Von der Wärmestrahlung  $Q_{2\text{ab}}$  wird der Anteil

$$Q_{1\text{abs}} = \epsilon_1 \cdot C_S \cdot \epsilon_2 \cdot \varphi_2 \cdot F_2 \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 = \epsilon_1 \cdot C_S \cdot \epsilon_2 \cdot \varphi_1 \cdot F_1 \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \quad (8)$$

vom ersten Körper absorbiert.

Die effektiv zwischen den Körpern 1 und dem Körper 2 ausgetauschte Wärmemenge ergibt sich aus der Differenz der Gleichungen (5) und (8) zu

$$Q_{12} = Q_{2\text{abs}} - Q_{1\text{abs}} = C_S \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \varphi_1 \cdot F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (9)$$

### 3. WÄRMEBELASTUNG VON BRANDMAUERN

In den folgenden Abschnitten werden die Wärmeströme berechnet, die einer Brandmauer oder einer ihr entsprechenden Einrichtung, im folgenden Trennwand genannt, durch Leitung, Konvektion und Strahlung von Brandraum zugeführt werden. Dabei wird angenommen, daß der Raum vor der Trennwand in seiner ganzen Breite und Höhe von einer Flammenfront erfüllt ist.

#### 3.1. Durch Leitung übertragener Wärmestrom

Im vorliegenden Fall erfolgt eine Wärmeleitung nur, wenn Träger, Rohrleitungen oder ähnliches von der Trennwand aus in den Brandraum hineinragen. Durch diese Teile erfolgt eine örtliche Wärmezufuhr an die Trennwand bei der Einspannstelle. Die Rauchgase übertragen ihre Wärme ausschließlich durch Konvektion an die Trennwand. Die

Wärmeleitung kann also für den hier betrachteten Fall außer acht gelassen werden.

### 3.2. Durch Konvektion übertragener Wärmestrom

An der Trennwand bewegen sich die heißen Rauchgase mit unterschiedlicher Geschwindigkeit nach oben. Sie geben durch Berührung ihre Wärme an die Wand ab. Der übertragene Wärmestrom ergibt sich nach Gleichung (2) zu:

$$\dot{Q}_K = \alpha \cdot F_W (t_g - t_w)$$

Die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  ist stark von der Strömungsgeschwindigkeit der Rauchgase abhängig. Da diese Geschwindigkeit nicht genau bekannt ist, kann nur geschätzt werden. Für den Wärmeübergang durch Berührung an Wärmegut in Ofenräumen wird nach [5] eine Wärmeübergangszahl von  $\alpha = 20 \text{ kcal/m}^2 \text{ h grd} = 23,2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  angenommen. Dieser Wert wird, da hier ähnliche Verhältnisse vorliegen, in Gleichung (2) eingesetzt. Die Temperatur der Rauchgase  $t_g$  wird in Wandnähe zu  $750^\circ\text{C}$  angenommen. An der Wand wird für die Berechnung eine Temperatur von  $100^\circ\text{C}$  zugrunde gelegt. Diese Temperatur wird gewählt, weil bei wasserberieselten Trennwänden maximal eine Temperatur von  $100^\circ\text{C}$  auftreten kann. Mit diesen Annahmen erhält man für die Wärmestromdichte infolge des konvektiven Wärmeaustausches:

$$\dot{q}_K = \alpha \cdot (t_g - t_w)$$

einen Wert von

$$\dot{q}_K = 13\,000 \text{ kcal/m}^2 \text{ h bzw. } 15\,100 \text{ W/m}^2$$

### 3.3. Durch Strahlung übertragener Wärmestrom

Durch die Strahlung wird nach Gleichung (5) der Wärmestrom  $\dot{Q}_{St}$  der Trennwand zugeführt. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß die Trennwand sowohl in die Richtung des Brandraumes als auch in den geschützten Raum abstrahlt. Wird mit  $F_2$  der Querschnitt der Halle bezeichnet, so muß als wärmeabstrahlende Fläche des Vorhanges  $2 \cdot F_2$  eingesetzt werden. Damit ergibt sich entsprechend der Gleichung (5):

$$\dot{Q}_{St} = \dot{Q}_2 \text{ zugef} = c_S \cdot \alpha_2 \left[ \varphi_1 \cdot F_1 \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - 2 \cdot F_2 \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (10)$$

oder mit  $\varphi_1 \cdot F_1 = \varphi_2 \cdot F_2$  (siehe Gleichung (8)),

$$\dot{Q}_{St} = \dot{Q}_2 \text{ zugf} = c_S \cdot \epsilon_2 \cdot F_2 \left[ \varphi_2 \cdot \epsilon_1 \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - 2 \cdot \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (11)$$

Das Winkelverhältnis  $\varphi_2$  ist hierbei auf ein Flächenelement  $\Delta F$  der Trennwand bezogen und nimmt maximal den Wert 1 an. Dieser Wert wird nach [4] erreicht, sobald sich ein Verhältnis von  $b/a = 5$  ergibt. Dabei ist  $a$  der senkrechte Abstand des Flächenteilchens von der strahlenden Fläche,  $b$  die kleinste Ausdehnung der strahlenden Fläche vom Flächenteilchen aus parallel zu diesem gemessen. Die Emissionszahl  $\epsilon_1$  des strahlenden Körpers ist abhängig von der Art und Beschaffenheit dieses Körpers. Im vorliegenden Fall kommen in erster Linie Flammen und gemauerte Wände als Strahler vor. Für stark rußende Flammen, wie sie bei Kunststoff- und Erdölbränden auftreten, kann eine Emissionszahl von fast 1 angenommen werden. Strahlendes Mauerwerk hat bei hohen Temperaturen eine Emissionszahl von etwa 0,8. Im ungünstigsten Fall, Strahlung durch rußende Flammen, muß also für  $\epsilon_1$  der Wert 1 eingesetzt werden. Die Emissions-

zahl  $\epsilon_2$  der bestrahlten Wand beträgt für Mauerwerk bei niedrigen Temperaturen ca. 0,92.  $\epsilon_2$  kann also ebenfalls mit dem Wert 1 in die Gleichung (11) eingesetzt werden. Mit  $\epsilon_2 = 1$  wird die absorbierte Strahlung nur um 8 % höher ermittelt.

Die Temperatur  $T_1$  des Strahlers wird nach [6] mit 1273 K entsprechend 1000°C angenommen. Wie im Abschnitt 3.2. bereits erwähnt, wird für die Wandtemperatur  $T_2$  373 K entsprechend 100°C eingesetzt. Mit diesen Werten ergibt sich die Wärmestromdichte  $\dot{q}_{st}$  zu:

$$\dot{q}_{st} = 128\ 310 \text{ kcal/m}^2 \text{ h bzw. } 149\ 100 \text{ W/m}^2$$

Die Rechnung zeigt, daß die Abstrahlung der Trennwand bei einer Temperatur von 100°C ca. 1,5 % der eingestrahlt Wärme entspricht und damit vernachlässigt werden kann.

#### 3.4. Vergleich der Wärmeströme, die durch Konvektion bzw. durch Strahlung an die Trennwand übertragen werden

Für den konvektiven Wärmeübergang ergibt sich bei den vorgegebenen Bedingungen eine Wärmestromdichte  $\dot{q}_k$  von 13 000 kcal/m<sup>2</sup> h bzw. 15 100 W/m<sup>2</sup> und für die Strahlung eine Wärmestromdichte von 130 000 kcal/m<sup>2</sup> h bzw. 150 400 W/m<sup>2</sup>. Daraus ergibt sich eine Gesamtwärmestromdichte  $\dot{q}_{ges}$  an der Trennwand von 143 000 kcal/m<sup>2</sup> h bzw. 166 400 W/m<sup>2</sup>. Der Anteil des konvektiven Wärmestromes beträgt im Verhältnis zum Gesamtwärmestrom 9,1 %, im Verhältnis zum eingestrahlt Wärmestrom 10 %. Mit ausreichender Genauigkeit kann daher in ähnlichen Fällen der Wärmestrom an eine Trennwand durch den eingestrahlt Wärmestrom mit einem Zuschlag von 10 % angegeben werden.

#### 4. ABFÜHRUNG DER ÜBERTRAGENEN WÄRME DURCH WASSERBERIESELUNG

Trennwände können auch aus Textilvorhängen bestehen. Ihre Temperatur wird durch Wasserberieselung auf einen niedrigen Wert gehalten.

##### 4.1. Wärmeübertragung an wasserberieselte Trennwände

Im Abschnitt 3. sind die Wärmeströme auf eine nichtberieselte Trennwand im ungünstigsten Fall berechnet worden. Für die gleichen eingestrahnten Wärmeströme wird jetzt das Verhalten einer berieselten Trennwand betrachtet. Der Wärmestrom  $\dot{Q}_{st}$ , der sich aus der Strahlungswärme  $\dot{Q}_{st}$  sowie aus der konvektiv übertragenen Wärme  $\dot{Q}_K$  zusammensetzt, wird an die berieselte Trennwand herangeführt. Der Anteil der Strahlungswärme  $\dot{Q}_{st}$  ändert sich gegenüber dem Betrag aus Abschnitt 3.3. nicht. Beim konvektiven Wärmeübergang tritt jedoch eine Änderung ein. Hier wird die Wärme der Rauchgase zunächst an den entstehenden Wasserdampf und von diesem an den Wasserfilm übertragen. Dadurch ändert sich die Wärmeübergangszahl  $\alpha$ .

Da jedoch der konvektive Wärmeübergang nur ca. 10 % des durch Strahlung übertragenen Wärmeanteiles entspricht, wird dieser Anteil hier nicht näher untersucht. Es ist anzunehmen, daß sich im Fall der berieselten Trennwand die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  verringert.

Einen weiteren Einfluß hat noch die partielle Absorption der Wärmestrahlung im Wasserdampf, der sich unter der Einwirkung der Wärmestrahlung vor dem Rieselfilm bildet. Dieser Einfluß wird später noch betrachtet.

#### 4.1.1. Wärmeübergang durch Strahlung an eine wasserberieselte Trennwand

Der vom Strahler an die berieselte Trennwand abgestrahlte Wärmestrom  $\dot{Q}_{st}$  trifft zunächst auf den Wasserfilm auf. Im Wasserfilm wird ein Teil des Wärmestromes absorbiert, ein Teil wird reflektiert und der Rest trifft auf die Trennwand. Von diesem auf die Trennwand auftreffenden Anteil wird nun wiederum ein Teil absorbiert, ein Teil durchgelassen und der Rest reflektiert, der nach einer teilweisen Absorption im Wasserfilm wieder austritt.

Das Reflexionsvermögen von Wasser beträgt nach [4] für die senkrechte Einstrahlung 3,4 %. Legt man einen 0,5 mm starken Wasserfilm auf der Trennwand zugrunde, so gehen nach [7] 81 % der nichtreflektierten Wärmestrahlung hindurch, 19 % werden von dem Wasserfilm absorbiert. Dabei wird nach [8] angenommen, daß der Hauptbestandteil der eingestrahlten Energie bei einer Wellenlänge zwischen 1 bis 3  $\mu\text{m}$  liegt, wie es für stark rußende Flammen gilt.

Wird der Einfluß der Wasserdampfschicht vor dem eigentlichen Wasserfilm vernachlässigt, so ergibt sich die gleiche eingestrahlte Wärmestromdichte wie in Abschnitt 3.3. nach Gleichung (11). Für einen Strahler mit der Temperatur von 1000°C sowie bei einer Wandtemperatur von 100°C erhält man somit eine zugeführte Wärmestromdichte von  $\dot{q}_{st} = 128\ 310\ \text{kcal/m}^2\ \text{h}$ . Mit ausreichender Genauigkeit wird für die weitere Berechnung eine Wärmestromdichte  $\dot{q}_{st} = 130\ 000\ \text{kcal/m}^2\ \text{h}$  bzw.  $151\ 000\ \text{W/m}^2$  angesetzt. Von diesem Wärmestrom werden an der Wasseroberfläche 3,4 % entsprechend  $4400\ \text{kcal/m}^2\ \text{h}$  bzw.  $5100\ \text{W/m}^2$  reflektiert. Der 0,5 mm starke Wasserfilm absorbiert von dem restlichen Wärmestrom 19 %, das sind  $23\ 500\ \text{kcal/m}^2\ \text{h}$  bzw.  $27\ 800\ \text{W/m}^2$ . Der Trennwand wird



der Rest von  $97\,800 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$  bzw.  $114\,000 \text{ W/m}^2$  zugeführt. Dieser Restwärmestrom wird nun teilweise von der Trennwand durchgelassen, absorbiert und reflektiert. Die drei Extremfälle, vollkommene Durchlässigkeit, vollkommene Absorption und totale Reflektion werden im folgenden untersucht.

Von einer vollkommen absorbierenden Wand wird die verbleibende Restwärme von  $97\,800 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$  entsprechend  $114\,000 \text{ W/m}^2$  aufgenommen. Reflektiert die Wand den einfallenden Wärmestrom vollständig, so wird von der  $0,5 \text{ mm}$  dicken Wasserschicht wiederum  $19 \%$ , d.h.  $18\,600 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$  bzw.  $21\,600 \text{ W/m}^2$  absorbiert. Der Rest von  $79\,200 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$  bzw.  $92\,200 \text{ W/m}^2$  wird von der Trennwand an den Strahler zurückgestrahlt. Da die Flamme als häufigster Strahler nicht reflektiert und dieser Restwärmestrom klein ist im Vergleich zur Gesamtenergie der Flammen und der Rauchgase, so entsteht keine weitere Rückwirkung auf die Trennwand. Ist die Trennwand vollkommen durchlässig, so gelangt der Wärmestrom von  $97\,800 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$  entsprechend  $114\,000 \text{ W/m}^2$  auf den rückwärtigen Wasserfilm. Wird angenommen, daß dieser Wasserfilm ebenfalls  $0,5 \text{ mm}$  dick ist, so wird auch hier ein Anteil von  $19 \%$  absorbiert. Der restliche Teil des Wärmestromes von  $79\,200 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$  bzw.  $92\,200 \text{ W/m}^2$  wird jetzt in den hinter der Strahlwand liegenden Raum abgestrahlt. Diese ermittelten Werte für die Wärmebelastung der Trennwand bzw. des Wasserfilmes vor und hinter dem Vorhang sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

#### 4.2. Erforderliche Wassermenge zum Abführen der einstrahlten Wärme

Im folgenden werden die Wassermengen berechnet, die zur Kühlung der Trennwände erforderlich sind. Diese Wasser-

mengen müssen so groß sein, daß durch ihr Aufheizen und anschließendes Verdampfen die zugeführte Wärme vollständig abgeführt wird.

#### 4.2.1. Trennwand absorbiert vollständig

Für diesen Fall ergibt sich die erforderliche Wasserstromdichte zum Abführen der Wärmemenge, die direkt dem Wasserfilm zugeführt wird, zu:

$$39,2 \text{ l/m}^2 \text{ h}$$

Zum Abführen der Wärmemenge, die der Trennwand zugeführt wird, sind

$$163 \text{ l/m}^2 \text{ h}$$

erforderlich.

Die gesamte notwendige Berieselungsdichte beträgt damit für diesen Fall

$$202 \text{ l/m}^2 \text{ h}$$

auf der dem Strahler zugewandten Seite der Trennwand.

Der Wärmeübergang von der Trennwand an den Wasserfilm berechnet sich nach der Gleichung

$$\dot{Q}_{WF} = \alpha_{WF} \cdot \Delta t \cdot F \quad \text{bzw.} \quad (12a)$$

$$\dot{q}_{WF} = \alpha_{WF} \cdot \Delta t \quad (12b)$$

darin ist:

- F die Fläche für den Wärmeaustausch,
- $\Delta t$  die Temperaturdifferenz zwischen Wand und Wasserfilm
- $\alpha_{WF}$  die Wärmeübergangszahl zwischen Wand und Wasserfilm.

Die Wärmeübergangszahl  $\alpha_{WF}$  von der Wand an den Film ergibt sich nach [4] für den 0,5 mm dicken Wasserfilm bei einer angenommenen Gesamthöhe des Vorhanges von 10 m sowie einer angenommenen Berieselungsdichte von  $100 \text{ l/m}^2 \text{ h}$  zu:

$$\alpha_{WF} = 4800 \text{ kcal/m}^2 \text{ h grad}$$

Mit Gleichung (12b) ergibt sich eine Temperaturdifferenz  $\Delta t$  von

$$20,4^\circ\text{C}$$

Mit den angenommenen Voraussetzungen stellt sich also zwischen Trennwand und Wasserfilm eine Temperaturdifferenz von etwa  $20^\circ\text{C}$  ein. Bei einer angenommenen Wassertemperatur von  $90^\circ\text{C}$  ergibt sich somit eine Vorhangtemperatur von  $110^\circ\text{C}$ .

#### 4.2.2. Trennwand reflektiert vollständig

Entsprechend dem vorhergehenden Abschnitt ist hier eine erforderliche Wasserstromdichte von

$$70,4 \text{ l/m}^2 \text{ h}$$

zum Abführen der vom Wasserfilm aufgenommenen Wärme auf der dem Strahler zugewandten Seite der Trennwand erforderlich.

#### 4.2.3. Die Trennwand ist für Strahlung vollkommen durchlässig

Ist die Trennwand für die Wärmestrahlung vollkommen durchlässig, so tritt, wie im Abschnitt 4.1.1. schon ausgeführt, eine Absorption der Wärmestrahlung nur innerhalb

der auf beiden Seiten der Trennwand herabrieselnden Wasserfilme auf. Zum Abführen dieser von den Wasserfilmen absorbierten Wärmemengen sind auf der Vorderseite

$$39,2 \text{ l/m}^2 \text{ h}$$

und für die Rückseite

$$31,0 \text{ l/m}^2 \text{ h}$$

erforderlich. Der nicht mit dem Wasser abgeführte Wärmestromanteil von  $85\,900 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  bzw.  $103\,500 \text{ W/m}^2$  wird in den zu schützenden Raum hinter der Trennwand eingestrahlt.

#### 4.3. Einfluß des Wasserdampfes auf die Wärmeeinstrahlung

Die Wärmestrahlung wird bei den vorliegenden Fällen durch die vorhandenen Anteile an  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ -Dampf beeinflusst. Diese beiden Gase emittieren und absorbieren Strahlung im Ultrarot-Bereich. Wesentlich für die absorbierte Wärmestrahlung ist dabei der Partialdruck  $p$  und die Schichtdicke  $s$  des Gases. Im folgenden wird der Einfluß des Wasserdampfes untersucht, der sich zwischen dem Strahler und der Wasseroberfläche an der Trennwand bildet. Der Partialdruck des Wasserdampfes in unmittelbarer Nähe der Trennwand kann mit 1 ata angenommen werden, die Schichtdicke wird 0,1 m geschätzt. Für dieses Produkt  $p \times s = 0,1 \text{ ata m}$  ist nach [4] die Emissionszahl  $\epsilon_{\text{H}_2\text{O-D}} = 0,22$ . Mit diesem Wert errechnet sich nach Gleichung

$$\dot{Q}_{\text{H}_2\text{O}} = \epsilon_1 \cdot \epsilon_{\text{H}_2\text{O-D}} \cdot \varphi_1 \cdot C_S \cdot \Delta F \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{H}_2\text{O-D}}}{100} \right)^4 \right] \quad (13)$$

bei  $T_1 = 1273 \text{ K (1000}^\circ\text{C)}$  und  $T_{\text{H}_2\text{O-D}} = 373 \text{ K (100}^\circ\text{C)}$

eine vom Wasserdampf absorbierte Strahlungswärme von

26 500 kcal/m<sup>2</sup> h bzw. 30 800 W/m<sup>2</sup>

Bei einer geschätzten stündlich verdampften Wassermenge von ca. 100 kg/m<sup>2</sup> ergibt sich ein Temperaturanstieg des Dampfes durch die partielle Absorption der Wärmestrahlung des H<sub>2</sub>O-Dampfes von:

265 kcal/kg

Mit dieser Wärmemenge erhält man eine Temperatursteigerung des Wasserdampfes um  $\Delta t = 600^{\circ}\text{C}$ . Bei einer Anfangstemperatur des Dampfes von  $100^{\circ}\text{C}$  ergibt sich damit eine Endtemperatur von  $700^{\circ}\text{C}$ .

Diese Temperatur von  $700^{\circ}\text{C}$  liegt in der Nähe der Rauchgastemperatur in Wandnähe. Der konvektive Wärmeübergang wird damit wesentlich kleiner bzw. ist bei gleichen Temperaturen von Wasserdampf und Rauchgas gleich null. Da der konvektive Wärmeanteil von 10 % der gesamten zugeführten Wärme schon klein ist, nimmt er infolge der hohen Wasserdampf Temperatur einen noch unbedeutenderen Anteil am Gesamtwärmestrom ein. Für die weiteren Berechnungen kann deshalb der konvektive Wärmestrom an den Vorhang vernachlässigt werden.

##### 5. FILMDICKE UND WASSERMENGE AN BERIESELTEN WÄNDEN

Die Berechnung der Filmdicke in Abhängigkeit von der Wassermenge erfolgt nach [4]. Wesentlich für die Berechnung ist die Reynoldszahl  $Re$  der Filmströmung.

$$Re = \frac{G_F}{\eta g} \quad (14)$$

Hierin ist:

- $G_F$  der Flüssigkeitsstrom je Einheit der Wandbreite,
- $\eta$  die dynamische Zähigkeit und
- $g$  die Erdbeschleunigung.

Der Flüssigkeitsstrom  $G_F$  ändert sich mit der Gesamthöhe  $h$  der Trennwand. Er kann aus  $\dot{w} \times h$  berechnet werden. Dabei ist  $\dot{w}$  die erforderliche Berieselungsdichte pro  $m^2$  Trennwand. Damit wird

$$Re = \frac{w \cdot h}{\eta \cdot g \cdot 3600} \quad (15)$$

Mit dieser Re-Zahl ergeben sich die Filmdicken und die Wärmeübergangszahlen nach [4]. In Abhängigkeit von der Gesamthöhe der Trennwand ist die Filmdicke im Anschluß an die Anlaufstrecke bei  $\dot{w} = 100$  und  $150 \text{ l/m}^2 \text{ h}$  Berieselungsdichte und verschiedenen Wassertemperaturen berechnet worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 wiedergegeben.

## 6. VERSUCHE ZUR ERMITTLUNG DER ERFORDERLICHEN BERIESELUNGSDICHTE

Um die theoretisch ermittelten Werte mit gemessenen Werten vergleichen zu können, wurden Versuche an wasserberieselten Textilvorhängen durchgeführt.

### 6.1. Versuchsaufbau

Als Strahlungsquelle wurde bei diesen Versuchen eine Strahlwand nach dem System Holden der Firma Buderus verwendet. Die Funktionsweise dieser Strahlwand ist im Bild 1 dargestellt. Über die Rohrleitung 1 wird das

vorgemischte Gas-Luftgemisch dem Verteilerkasten 2 zugeführt. Den Verteilerkästen 3 wird mit einer getrennten Leitung Kühlluft zugeführt. Durch die porösen Steine 4 tritt das Gemisch von Gas und Luft aus und verbrennt teilweise in den Poren sowie an der Stein-oberfläche in einer Vielzahl kleiner Flämmchen. Durch die äußerste Steinschicht wird reine Luft zur Kühlung des Gehäuses 5 geblasen. Die Temperaturverteilung innerhalb der Strahlwand ist in Bild 1 für einen bestimmten Betriebsfall mit eingetragen. Bei den durchgeführten Versuchen wurde die Strahlwand mit Propan-gas betrieben. Die Größe der Strahlwand kann dem Bild 1 entnommen werden. Bild 2 und 3 zeigen die Rückseite und die dem Vorhang zugewandten Seite der Strahlwand. Im Abstand von 1,3 m vor der Strahlwand hing der be-rieselte Textilvorhang. Dieser war ca. 2 m hoch und ca. 3 m breit. Die Aufhängung des Vorhanges sowie die Halterung der Düsen zeigen die Bilder 4 und 5. Das Rohr 1 in diesen Bildern ist an einem verschiebbaren Wagen befestigt, der durch eine Öffnung der Decke nach unten hängt. An dieses Rohr ist mit Haltestücken eine Winkelschiene 2 befestigt. Gegen diese Schiene wird der Vorhang mit einem Flacheisen von gleicher Länge geklemmt. Weiter sind mit den Klemmstücken 3 auf beiden Seiten des Vorhanges jeweils 2 Düsenhalter befestigt. Mit diesen Düsenhaltern 4 kann jede gewünschte Anordnung der Düsen zum Vorhang eingestellt sowie der Abstand zwischen den Düsen verändert werden.

Am Vorhang waren Thermo-elemente angebracht, mit denen seine Oberflächentemperatur in verschiedenen Höhen senkrecht vor der Strahlwand gemessen werden konnte. Diese Thermo-elemente bestanden aus einzelnen Kupfer- und Konstantandrähten von 0,1 mm Durchmesser, die an der betreffenden Stelle in den Vorhangstoff einge-

eingespleißt wurden. Um den ablaufenden Wasserfilm nicht zu stören, wurden die Anschlüsse der Thermoelemente auf der dem Strahler abgewandten Vorhangseite herausgeführt.

Die Wasserversorgung für die Berieselung erfolgt über einen Druckwindkessel, der bei niedrigen Drücken vor der Düse direkt an das Wassernetz angeschlossen wurde. Für hohe Drücke wurde zwischen einem Vorratsbehälter und dem Druckwindkessel eine TS 8/8 geschaltet. Mit einer Meßblende wurde die den Düsen zugeführte Wassermenge ermittelt. Die am Vorhang herabrieselnden Wassermengen wurden mit 19 quadratischen Blechdosen von 10 cm Seitenlänge ermittelt, die in einem Rahmen unter dem Vorhang aufgestellt wurden. Dieser Rahmen konnte auf Schienen bewegt werden und wurde zur Messung für eine bestimmte Zeit unter den Vorhang geschoben. Das Bild 6 zeigt diese Vorrichtung.

## 6.2. Versuchsdurchführung

Bei den durchgeführten Versuchen wurde ein Glasfasergewebe aus Einfachgarn mit der Bezeichnung ES 9-680 dtex Z 25-D 51 mit einer Fadeneinstellung von 12 Fäden pro Zentimeter in Kett und Schuß verwendet. Die Reißfestigkeit des Gewebes beträgt nach DIN 53857 34 kp/cm. Das Flächengewicht des Gewebes beträgt ca. 162 g/m<sup>2</sup>. Um eine Beeinflussung der Meßergebnisse durch Faltenbildung am Vorhang möglichst klein zu halten und um ein Flattern zu vermeiden, wurde dieser leicht nach den beiden Seiten hin verspannt. Die Versuche wurden nun so durchgeführt, daß zunächst für verschiedene Düsen und Düsenanordnungen die am Vorhang herabrieselnden Wassermenge sowie ihre Verteilung über die Vorhangbreite ermittelt wurde. Bei diesen Versuchen war die Strahlwand außer Betrieb. Anschließend wurde



für eine bestimmte Düsenanordnung bei gleicher Berieselungsstärke wie bei den vorhergehenden Versuchen die Strahlwand auf verschiedene Leistungen eingeregelt. Diese Leistungseinregelung erfolgte über die zugeführten Luft- und Gasströme. Mit den Blechbehältern wurde bei unterschiedlichen Leistungen der Strahlwand die vom Vorhang herabrieselnde Wassermenge bestimmt. Aus der Differenz der aufgefangenen Wassermengen mit und ohne Bestrahlung durch die Strahlwand ergab sich der Wasserverbrauch an einer bestimmten Stelle des Vorhanges für die Abfuhr der eingestrahlt und durch Konvektion übertragenen Wärmemenge vom Vorhang.

Es wurden verschiedene handelsübliche Düsen von drei Herstellern zur Berieselung des Glasfasergewebevorhanges verwendet. Bei den Versuchen wurde der gesamte zugeführte Wasserstrom sowie die unten am Vorhang ablaufende Wassermenge gemessen. Die Messungen erfolgten bei drei verschiedenen Drücken des zugeführten Wassers. Die verwendeten Düsentypen sind in Bild 7 dargestellt.

### 6.3. Versuchsauswertung

#### 6.3.1. Zugeführter Wasserstrom und Wasserverteilung

Mit den in Abschnitt 6.1. beschriebenen Blechbehältern wurde die Wassermenge bestimmt, die in einer bestimmten Zeit bei verschiedenen Düsen bzw. Düsenanordnungen unten am Vorhang abläuft. Die in jedem Behälter aufgefangene Wassermenge pro Zeiteinheit ergibt die Verteilung der Berieselungsstärke über die Vorhangbreite. Bei einer idealen Berieselung durch eine Düse würde sich eine völlig gleiche Berieselungsstärke über eine bestimmte Breite des Vorhanges ergeben, die unabhängig von der zugeführten Wassermenge wäre. Von diesem

Idealfall weichen die gemessenen Berieselungsverteilungen jedoch ab. Zur Beurteilung der Verteilung bei verschiedenen zugeführten Wasserströmen wurde eine reduzierte Wassermenge  $\dot{g}_r$  berechnet. Diese erhält man aus dem Verhältnis der in einem Behälter aufgefangenen Wassermenge zur gesamten aufgefangenen Wassermenge:

$$\dot{g}_r = \frac{\dot{g}_{wi}}{\sum_{i=1}^{19} \dot{g}_{wi}} \cdot 100 \quad (16)$$

Die so ermittelten reduzierten Wasserströme sind in den folgenden Bildern für verschiedene Düsen und Düsenanordnungen aufgetragen.

Mit der Düsenanordnung a, siehe Bild 8, ergibt sich für die Düsen IA/1, IB/1 und II/1 die in Bild 9 angegebene Verteilung der Berieselungsstärke über den Vorhang. Der den Düsen bei diesen Versuchen zugeführte Wasserstrom betrug für die Düse IA/1 sowie IB/1 40 l/min und für die Düse II/1 34,5 l/min. In den 19 Behältern wurde bei der Düse IA/1 und IB/1 jeweils ca. 18 l/min bei der Düse II/1 ca. 20 l/min aufgefangen. Daraus ergibt sich, daß auf eine Breite von 1,8 m eine mittlere Berieselungsstärke von 10 l/min m im ersten Fall und von 11,1 l/min m im zweiten Fall erreicht werden kann. In der Tabelle 3 sind diese obengenannten Werte für alle untersuchten Düsen und deren Anordnung aufgetragen. Diese Anordnung a der genannten Düsen sowie aller anderen Düsen mit 120° Sprühwinkel kann nicht direkt für die Berieselung von Trennwänden eingesetzt werden. Es entsteht nämlich seitlich von den Düsen eine Zone, die nicht berieselt wird (siehe Bild 10).

Um einen Sprühwinkel von über 180° zu erreichen, wird die Anordnung b (Bild 8) gewählt. Hierbei werden zwei Düsen in einem Winkelstück verschraubt. Die Verteilung der Berieselungsstärke ergibt sich bei dieser Anordnung

entsprechend der Darstellung in Bild 11 für die Düse II/2 und im Bild 12 für die Düse II/1. In dieses Bild 12 ist zusätzlich noch die Verteilung der Berieselungsstärke bei der Düsenanordnung c (Bild 8) eingetragen. Die Düsenanordnung c geht von der Anordnung a aus. Der Rohrbogen mit der eingeschraubten Düse wurde aber um  $45^\circ$  gedreht.

Die Düsen des Types III weichen in ihrem Aufbau grundsätzlich von den vorhergehenden ab, wie es im Bild 7 zu sehen ist. Der Sprühwinkel beträgt bei diesen Düsen ca.  $220^\circ$ . Die Verteilung der Berieselungsstärke bei der Düsenanordnung d (Bild 8) ist für diese Düse in den Bildern 13 bis 15 für 3 Düsen mit unterschiedlicher Austrittsbohrung bei 3 Drücken dargestellt. In Bild 16 ist der Durchsatz durch alle bei diesen Untersuchungen angegebenen Düsen in Abhängigkeit vom Druck aufgetragen.

Maßgebend für die Berieselungsstärke ist nicht der den Düsen zugeführte Wasserstrom, sondern der Wasserstrom, der am Vorhang herunterrieselt. Einen Überblick über das Verhältnis des zugeführten Wasserstromes zum herabrieselnden Wasserstrom sowie der Berieselungsbreite gibt die Tabelle 3. Diese Tabelle zeigt, daß nur ca. 50 % der zugeführten Wassermenge zur Abführung der auf den Vorhang eingestrahltten Wärme ausgenutzt werden, wenn nur eine Düse bzw. Düsengruppe zur Berieselung des Vorhanges verwendet wird. Ein Teil des restlichen Wassers trifft überhaupt nicht auf den Vorhang und sprüht in den Raum vor dem Vorhang (siehe Bild 17 und 18). Ein weiterer Teil der restlichen 50 % ergibt in seitlich größerer, bei den Versuchen nicht erfaßten Entfernung von der Düse, eine schwache Berieselung des Vorhanges. Dieser Anteil wird bei einem breiten Vorhang und der hierbei notwendigen Anordnung von mehreren Düsen bzw. Düsengruppen jedoch wieder ausgenutzt. Die höchste Be-

rieselungsdichte mit 15,3 l/min m wurde mit der Düse III/1 bei einem Druck von 3 atü bzw. 4 bar erreicht. Die wirksame Wassermenge beträgt hierbei 54,5 %. Bei der Anordnung mehrerer Düsen bzw. Düsengruppen zur Berieselung eines breiten Vorhanges kann dieser Betrag wahrscheinlich auf ca. 65 % ansteigen.

### 6.3.2. Erforderliche Berieselungsdicht zum kühlen des Vorhanges

Der zugeführte Wärmestrom an den Vorhang setzt sich auch bei den durchgeführten Versuchen aus einem konvektiven Anteil und einem Strahlungsanteil zusammen. Das Verhältnis von konvektiv übertragener Wärme zur eingestrahlt Wärme ist hier jedoch anders als in Abschnitt 3. angegeben. Durch eine wesentlich geringere eingestrahlte Wärme hat die konvektiv übertragene Wärme einen höheren Anteil an der Gesamtwärme. Die geringere, durch Strahlung übertragene Wärme ist bedingt durch die niedrigere Temperatur der Strahlwand (ca. 600 bis 800°C) und durch ein Winkelverhältnis von  $\varphi < 1$ .

Ermittelt wurde bei den Versuchen jeweils der Wärmestrom, der an einen Streifen des Vorhanges von 10 cm Breite übertragen wurde. Diese Einteilung in Streifen ergab sich durch die 10 cm breiten Blechbehälter, in denen das ablaufende Wasser aufgefangen wurde.

Konvektiv wird dem Streifen der Wärmestrom entsprechend der Gleichung 2 zugeführt. Für die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  wird auch hier wieder der Wert von 20 kcal/m<sup>2</sup> h grd entsprechend 23,2 W/m<sup>2</sup> K eingesetzt. Aus der geometrischen Anordnung der Strahlwand zu den einzelnen Streifen ergeben sich verschiedene Winkelverhältnisse und damit unterschiedliche Wärmeeinstrahlungen. Diese Wärmeein-

strahlung auf die einzelnen 10 cm breiten Streifen ist in Bild 19 in Abhängigkeit von der Vorhangbreite aufgetragen. Zur Orientierung ist die Lage der Strahlwand mit eingetragen. In Bild 20 sind die Wärmeströme eingetragen, die durch Strahlung und Konvektion an die Streifen des Vorhanges bei 2 verschiedenen Einstellungen der Strahlwand übertragen wurden. Die mittlere Strahlwandtemperatur (schwarze Temperatur) der Strahlwand betrug im Fall A  $748^{\circ}\text{C}$  und im Fall B  $684^{\circ}\text{C}$ . Weiter sind hier die unten am Vorhang ablaufenden Wassermengen für die entsprechenden Streifen bei der für diesen Zweck speziellen Düsenanordnung e aufgezeichnet. Kurve 1 wurde ohne Wärmezufuhr ermittelt, die Kurven 2 und 3 bei der maximalen (A) und bei einer mittleren (B) Leistung der Strahlwand.

Für den Fall A (100 % Leistung der Strahlwand) und für den Fall B (66,7 % Leistung der Strahlwand) ergeben sich die folgenden maximal zugeführten Wärmeströme an einen Streifen mit  $F = 0,2 \text{ m}^2$  nach Tabelle 4.

Zum Abführen der Wärmeströme nach Tabelle 4 wurden folgende Wassermengen ermittelt:

Im Fall A: 102 g/min,  
im Fall B: 90 g/min.

Mit diesen Werten ergeben sich die erforderlichen Wassermengen bei einem zugeführten Wärmestrom von 1 W zu:

Fall A:  $24,2 \cdot 10^{-3} \text{ g/W min}$   
Fall B:  $22,6 \cdot 10^{-3} \text{ g/W min}$ .

Als Mittelwert erhält man aus den oben berechneten Beträgen

$23,4 \cdot 10^{-3} \text{ g/W min}$

## 7. ÜBERTRAGUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE AUF GROSSE VORHÄNGE

Bei den durchgeführten Versuchen hatte der Strahler nur eine Fläche von  $1 \text{ m}^2$ . Werden wasserberieselte Vorhänge zur Abtrennung von Hallen verwendet, so muß mit Abmessungen in der Größe von  $100 \text{ m}^2$  und mehr gerechnet werden ([3]). Die bei solchen Abmessungen im Brandfall auftretenden Wärmeströme sind im Abschnitt 3. berechnet worden.

### 7.1. Erforderliche Berieselungsdichte für große Vorhänge

Aufgrund der durchgeführten Versuche wurde eine Berieselungsdichte von

$$23,4 \cdot 10^{-3} \text{ g/min W}$$

ermittelt.

Im Abschnitt 4. wurden für den maximalen Wärmestrom an eine Trennwand  $130\,000 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$ , entsprechend  $151\,000 \text{ W/m}^2$ , berechnet. Für diesen Wärmestrom ergibt sich eine erforderliche Berieselungsdichte von

$$3,53 \text{ l/m}^2 \text{ min bzw. } 212 \text{ l/m}^2 \text{ h}$$

Bei den Versuchen, die zur Ermittlung dieses Wertes führten, wurde nur die dem Strahler zugewandten Seite des Vorhanges berieselt. Weitere Versuche geben darüber Auskunft, welche Temperaturänderungen am Vorhang auftreten, wenn nur die dem Strahler abgewandten Seite des Vorhanges berieselt wird.

## 7.2. Berieselung des Vorhanges auf verschiedenen Seiten

Zur Beurteilung des Wärmedurchganges durch das Vorhangmaterial wurden Versuche unter gleichen Bedingungen durchgeführt, bei denen einmal der Vorhang auf der dem Strahler zugewandten Seite und zum anderen auf der dem Strahler abgewandten Seite berieselt wurde. In Bild 21 sind die am Vorhang gemessenen Temperaturen für beide Versuche aufgetragen. Wie aus dieser Darstellung hervorgeht, beträgt die maximale Temperatursteigerung  $\Delta t_{\max} = 10^{\circ}\text{C}$ . Die Wärmestromdichte an dieser Stelle betrug  $30\ 500\ \text{W}/\text{m}^2$ . Bei einer maximalen Wärmezufuhr von  $151\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$  ergibt sich somit bei gleichen Vorhangeigenschaften eine Temperatursteigerung von ca.  $50^{\circ}\text{C}$ . Berieselt man einen Vorhang auf beiden Seiten mit jeweils der halben erforderlichen Wassermenge, so kann man unter gleichen Bedingungen mit einer Temperaturerhöhung von  $25^{\circ}\text{C}$  rechnen.

Aufgrund dieser Überlegungen kann also ein Vorhang zur Abfuhr der durch Strahlung und Konvektion aufgenommenen Wärme auf beiden Seiten mit jeweils der Hälfte der für die dem Brand zugewandten Seite erforderlichen Wassermenge berieselt werden. Voraussetzung dafür ist jedoch, daß das verwendete Vorhangmaterial der Qualität des bei den Versuchen verwendeten Vorhanges entspricht. Da bei den Versuchen ein wesentlich leichteres Vorhangmaterial als bei [ 3 ] verwendet wurde, wird empfohlen, jede Seite des Vorhanges mit ca. 75 % der erforderlichen Wassermenge zu berieseln, da noch keine weiteren Versuchswerte für schwere Vorhangstoffe vorliegen.

## 8. FOLGERUNGEN

Die durch Versuche ermittelte gesamte Berieselungsstärke von  $212\ \text{l}/\text{m}^2\ \text{h}$  stimmt mit dem berechneten Wert von

202 l/m<sup>2</sup> h nach Abschnitt 4.2.1. für ein Vorhangmaterial, das die eingestrahlte Wärme vollkommen absorbiert, sehr gut überein. Die ermittelte Berieselungsstärke von 212 l/m<sup>2</sup> h gilt jedoch nur, wenn für den großen Vorhang ein Vorhangmaterial mit ähnlichem Reflexionsvermögen verwendet wird, wie hier bei den Versuchen. Wie die Rechnung nach Abschnitt 4. zeigt, kann bei einem stärker reflektierenden Vorhang eine niedrigere Berieselungsdichte gewählt werden.

Diese hohe Berieselungsdichte von 212 l/m<sup>2</sup> h für die maximale Wärmezufuhr braucht jedoch nicht an jeder Stelle des Vorhanges vorhanden sein, da die Einstrahlung an den Rändern des Vorhanges auf ca. die Hälfte des maximalen Wertes absinkt. Für einen 10 m breiten und 5; 7,5 und 10 m hohen wasserberieselten Vorhang ergibt sich somit die in Bild 22 dargestellte Verteilung der pro Meter Vorhangbreite zuzuführenden Wassermenge unter der Annahme, daß sich die strahlende Fläche in 1,5 m Abstand parallel vor der Trennwand bzw. dem Vorhang befindet, und daß sie die gleiche Größe wie die Trennwand besitzt. Für andere Abmessungen der Trennwand ist die Verteilung ähnlich, muß jedoch jeweils neu berechnet werden.

Bei den angegebenen Wassermengen handelt es sich um die tatsächlich am Vorhang herabrieselnden Mengen. Inwieweit die den Düsen zugeführte Wassermenge vollständig am Vorhang herabrieselt oder zum Teil in den Raum vor dem Vorhang versprüht wird, ist für die jeweils verwendeten Düsen gesondert zu prüfen. Die Ergebnisse des Abschnittes 6.2.2. zeigen, daß nur ca. 50 % der gesamten, den Düsen zugeführten Wassermengen am Vorhang herab rieseln. Aufgrund dieser Ergebnisse



ist es anzustreben, andere Berieselungseinrichtungen zu entwickeln, als die bei diesen Versuchen verwendeten.

Zur Verteilung der Wassermenge auf die beiden Seiten des Vorhanges gilt die Betrachtung nach Abschnitt 7.2.. Dort wurde gezeigt, daß man mit einer gleichmäßigen Aufteilung der erforderlichen Wassermengen auf beiden Seiten des Vorhanges auskommen kann. Da noch keine Meßwerte bei sehr hohen Bestrahlungsdichten und dichtem Vorhang-material vorliegen, wird für jede Seite eine Berieselungsstärke von 75 % der erforderlichen Berieselungsdichte nach Bild 22 vorgeschlagen. Entsprechend der in Bild 22 aufgetragenen Werte für die erforderliche Wassermenge je Meter Vorhangbreite, ergeben sich mit der oben getroffenen Annahme die in Bild 23 angegebenen Wassermengen für eine Seite und 1 m Vorhangbreite. Diese Werte gelten wie im Bild 22 für einen 10 m breiten und 5,0; 7,5 und 10 m hohen Vorhang.

## 9. ZUSAMMENFASSUNG

Die Automation technologischer Fertigungsprozesse sowie die Rationalisierung des Transportes und der Lagerung erfordern in zunehmendem Maße immer größere, nicht unterteilte Fabrikations- und Lagerhallen. Um in einem Brandfall eine Ausweitung des Brandes zu verhindern, werden Regenwände und Wasserschleieranlagen installiert. Wie ein Großversuch zeigte, wird aber durch einen wasserberieselten Textilvorhang eine wesentlich bessere Abschirmung von Wärmestrahlung, Flugfeuer und Rauch erzielt. Für den sicheren Einsatz solcher wasserberieselter Textilvorhänge ist u.a. eine ausreichende Berieselungsdichte erforderlich. Der Ermittlung dieser Berieselungsdichte diente die vorliegende Untersuchung. Neben einer

allgemeinen Betrachtung der drei Wärmeübertragungsformen wurde die Wärmebelastung einer Brandmauer bzw. Trennwand im ungünstigsten Fall eines Brandes ermittelt. Anschließend wurden die gleichen Betrachtungen, wie sie für die Trennwand durchgeführt wurden, für eine wasserberieselte Wand angestellt.

Die durchgeführten Versuche erstreckten sich auf die Bestimmung der Berieselungsdichte, der Verteilung des zugeführten Wassers sowie auf die Ermittlung des Verhältnisses der am Vorhang herabrieselnden Wassermenge zu der den Düsen zugeführten Menge. Bei einer speziellen Düsenanordnung bzw. Wasserverteilung am Vorhang wurde dieser mit einer Hochleistungsstrahlwand bestrahlt. Aus der Abnahme der unten am Vorhang ablaufenden Wassermenge wurde der Wasserverbrauch zum Abführen der zugeführten Wärmeströme ermittelt. Weitere Versuche ergaben die Temperaturänderungen am Vorhang bei jeweils einseitiger Berieselung der Vorder- und Rückseite. Die Meßergebnisse wurden auf große Vorhänge sowie auf die vorher berechneten Wärmebelastungen im Brandfall übertragen.

Die ermittelte Berieselungsdichte ist jedoch nicht für jede Stelle des Vorhanges erforderlich. Aufgrund der Einstrahlungsverhältnisse für einen 10 m breiten und 5,0; 7,5 und 10 m hohen Vorhang wurde die erforderliche Wassermenge je m Vorhangbreite berechnet und graphisch dargestellt.

LITERATURVERZEICHNIS

- [ 1 ] Heselden, A.J.M. und Hinkley, P.L.:  
Measurements of the transmission of radiation  
through water sprays.  
Fire Technology 1(1965) Nr.2, S.130-137.
- [ 2 ] Seekamp, H.:  
Untersuchungen über die Wirkungsweise von  
Wasserschleieranlagen.  
VFDB-Zeitschrift 9(1960) Nr.2, S.34-38.
- [ 3 ] Seeger, P.G. und John, R.:  
Über Brandversuche mit einem wasserberieseltem  
Glasfaservorhang.  
VFDB-Zeitschrift 17(1968) Nr.4, S.123-132.
- [ 4 ] VDI-Wärmeatlas,  
Berechnungsblätter für den Wärmeübergang.  
Düsseldorf: VDI-Verlag 1963.
- [ 5 ] Heiligenstaedt, W.:  
Wärmetechnische Rechnungen für Industrie-  
öfen. 3. Auflage.  
Düsseldorf: Verlag Stahleisen 1951, Nachdruck 1955.
- [ 6 ] von Schwartz, E.:  
Handbuch der Feuer- und Explosionsgefahr.  
6. Auflage.  
München: Feuerschutzverlag Ph.L.Jung 1964. S.476.

[7] Geiger, R.:  
Das Klima bodennaher Luftschichten. 4. Auflage.  
Braunschweig: Vieweg-Verlag 1961. S.195.

[8] Pepperhoff, W.:  
Temperaturstrahlung.  
Darmstadt: Verlag von Dr. Steinkopff 1956.

Tabelle 1 Wärmebelastung der Trennwand und des Wasserfilmes bei verschiedenen Strahlungseigenschaften der Trennwand

maximale Wärmebelastung in kcal/m <sup>2</sup> h	Die Trennwand		
	absorbiert vollständig	refelktiert vollständig	ist vollständig durchlässig
Trennwand	97 800	-	-
Wasserfilm	vorn	23 500	42 100
	hinten	-	-
			18 600

Tabelle 2 Wärmefilmdicke an der Trennwand

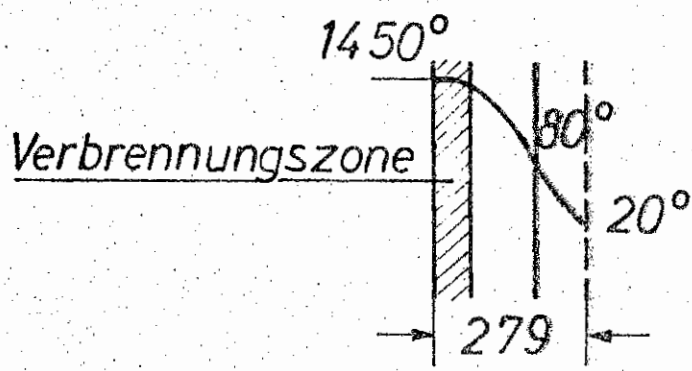
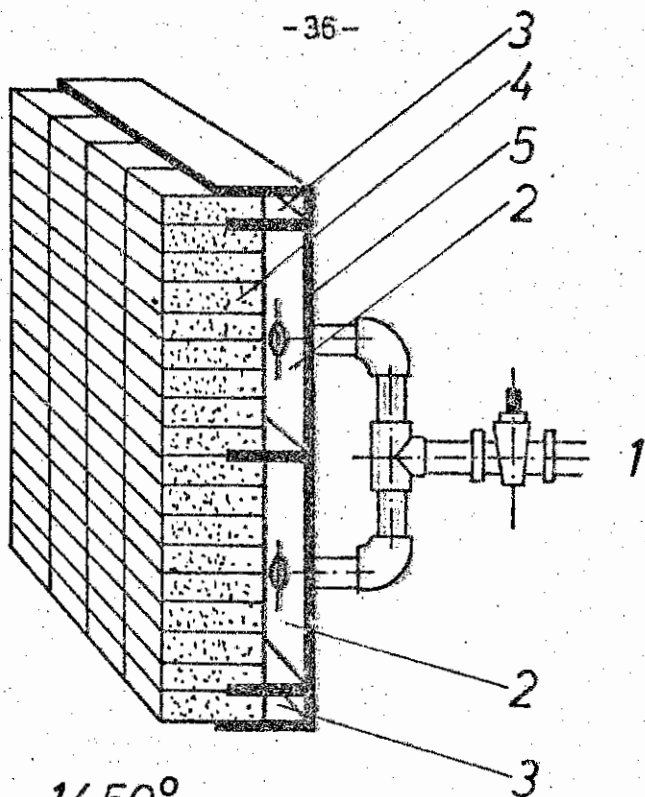
Wasser-temperaturen	°C	40		100	
dynamische Zähigkeit	kg s/m <sup>2</sup>	66,5 10 <sup>-6</sup>		28,8 10 <sup>-6</sup>	
Berieselungsdichte w	l/m <sup>2</sup> h	100	150	100	150
Gesamthöhe der Trennwand	m	Wärmefilmdicke mm			
4		0,28	0,32	0,20	0,25
6		0,32	0,37	0,25	0,32
8		0,35	0,42	0,30	0,38
10		0,38	0,47	0,33	0,42
12		0,42	0,52	0,37	0,48
14		0,45	0,55	0,40	0,51
16		0,48	0,60	0,44	0,55
18		0,52	0,66	0,47	0,58
20		0,55	0,69	0,50	0,60

Tabelle 3 Zuführter Wasserstrom  $\dot{w}_{\text{zugef}}$ , Berieselungsdichte, nutzbare Rieselbreite und am Vorhang herabrieselnder Wasserstrom  $\dot{w}_{\text{nutz}}$

Düsen-Typ	I A			I B			II			III			
	1	3	3	1	2	2	1	1	1	2	1	2	3
Düsen-Größe	a	a	b	b	a	2xd	a	b	d	b	c	c	c
Anordnung													
Wasser- zulauf													
bei 2 at							28						13,0
3 at	40	5,55	10,8	55,5	15,0	30	34,5	50,0	34,5	15	42	28,0	15,5
5 at							43,5				54	35,9	17,8
nutzbare Riesel- breite													
bei 2 at							1,1				1,3	1,3	1,2
3 at	1,9	1,1	1,3	1,4	1,1	1,9	1,4	1,5	1,1	1,3	1,5	1,4	1,3
5 at							1,6				1,8	1,7	1,4
am Vorhang herab- rieselnde Wassermenge													
bei 2 at							15,2				19,5	12,5	6,7
3 at	18,7	3,6	6,8	20,7	8,55	9,4	17,8	23,5	8,55	8,7	22,9	14,0	8,0
5 at							18,5				25,2	15,9	9,8
mittlere Beriese- lungsdichte													
bei 2 at							13,8				15,0	9,6	5,6
3 at	9,5	3,3	5,2	14,8	7,8	4,9	12,7	15,4	7,6	6,7	15,3	10,0	6,2
5 at							11,5				14,0	9,4	7,0
$\dot{w}_{\text{nutz}}$							54,0				56,4	55,6	52,0
bei 2 at													
3 at	45,5	64,9	62,9	37,3	57	31,4	51,6	46	24,8	58	54,5	50,0	52,0
5 at							42,5				46,6	44,3	55,0
$100 \frac{\dot{w}_{\text{nutz}}}{\dot{w}_{\text{zugef}}}$													

Tabelle 4 Maximal an einen Streifen des wasserberieselten Vorhanges zugeführter Wärmestrom

Wärmestrom	$\dot{Q}_{\text{Konvektion}}$	$\dot{Q}_{\text{Strahlung}}$	$\dot{Q}_{\text{ges}}$
Dimension	W	W	W
Fall A	3020	1517	4537
Fall B	2560	1170	3730



- 1 Gas- und Luftzufuhr
- 2 Verteilerkasten für Gas-Luft-Gemisch
- 3 Verteilerkasten für Kühlluft
- 4 poröse Steine
- 5 Gehäuse

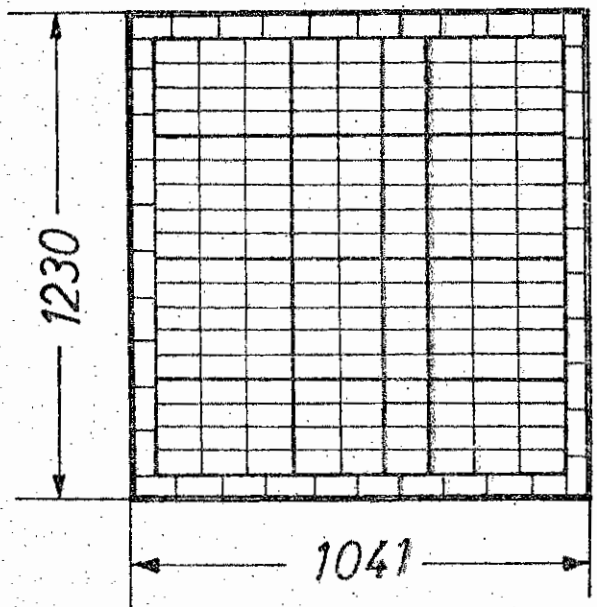


Bild 1. Aufbau, Temperaturverlauf und Abmessungen der Strahlwand



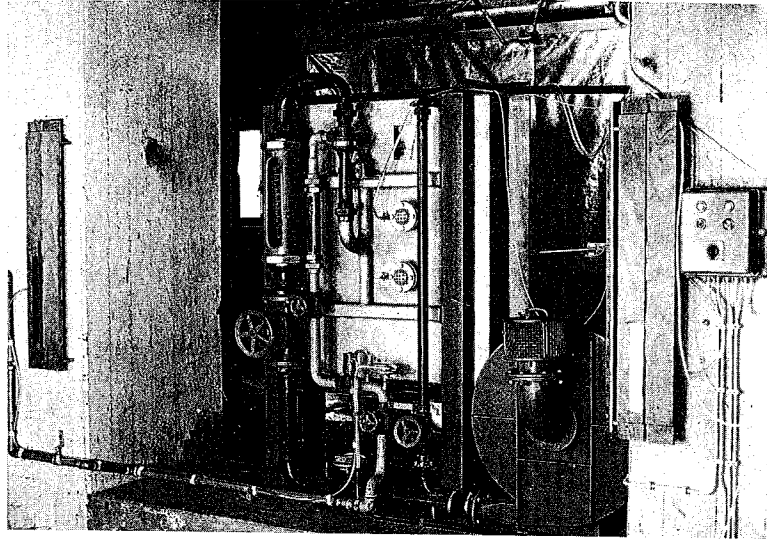


Bild 2 Rückseite der Stahlwand mit Gaszuführung und Verbrennungsluftgebläse

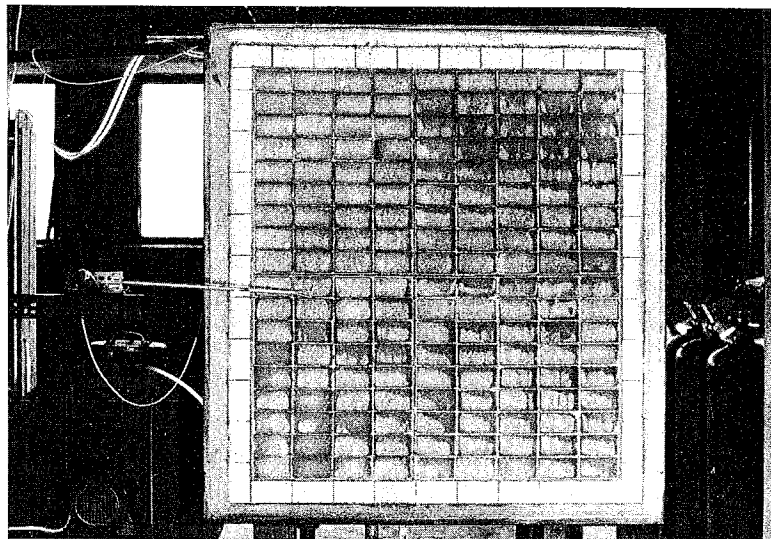


Bild 3 Dem Vorhang zugewandte Seite der Stahlwand

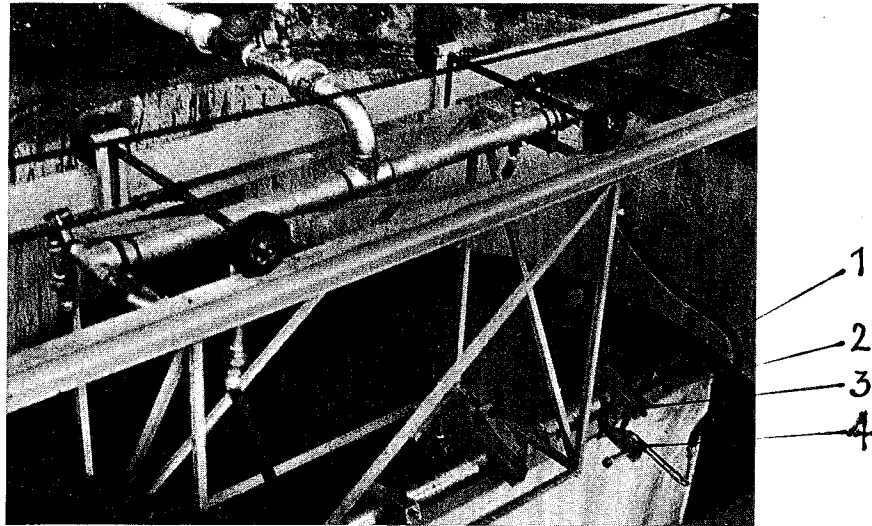


Bild 4      Aufhängung des Vorhanges am verschieb-  
baren Wagen

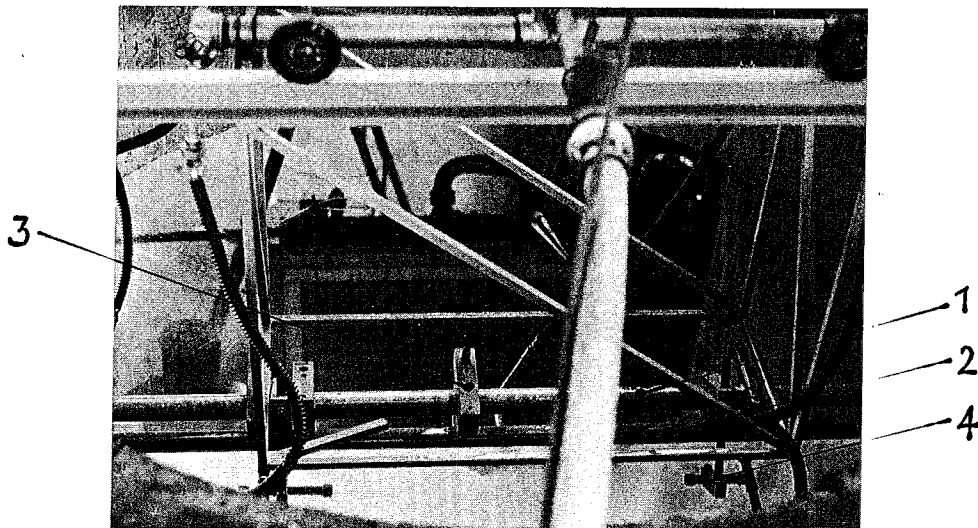


Bild 5      Befestigung des Vorhanges und der Düsen

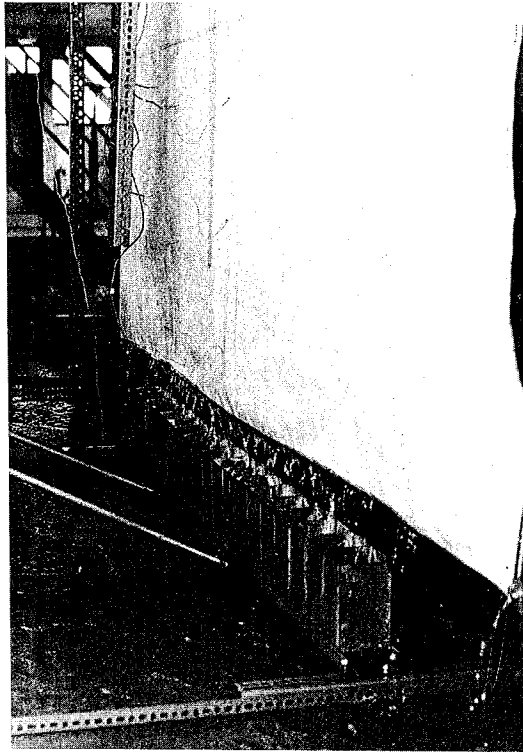


Bild 6      Vorrichtung zur Messung der am Vorhang  
herabrieselnden Wassermenge und ihre  
Verteilung

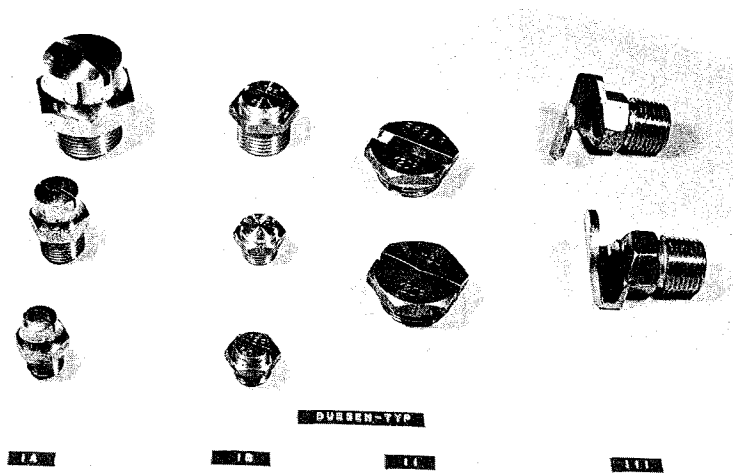
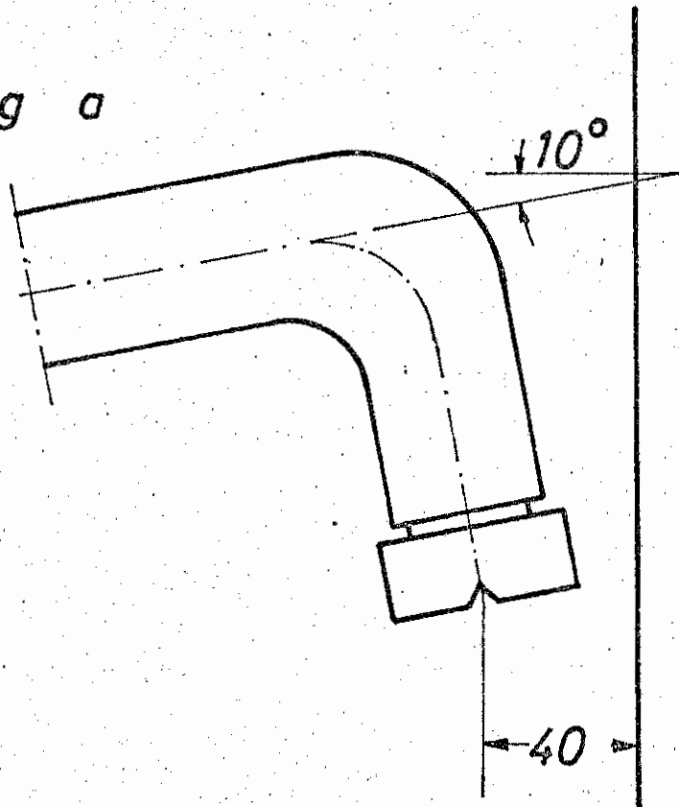
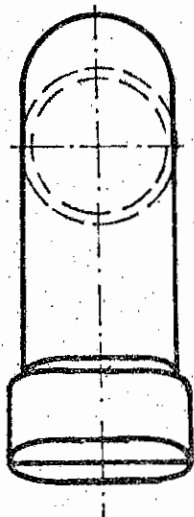


Bild 7      Bei den Versuchen verwendete Düsentypen

### Düsenanordnung a



### Düsenanordnung b

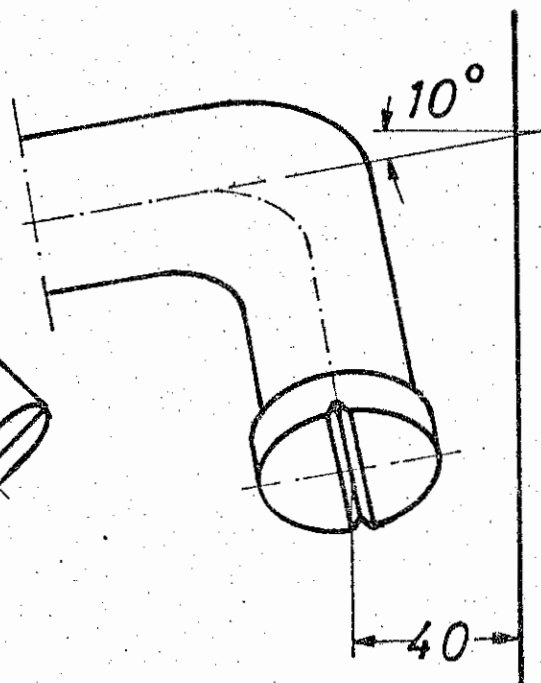
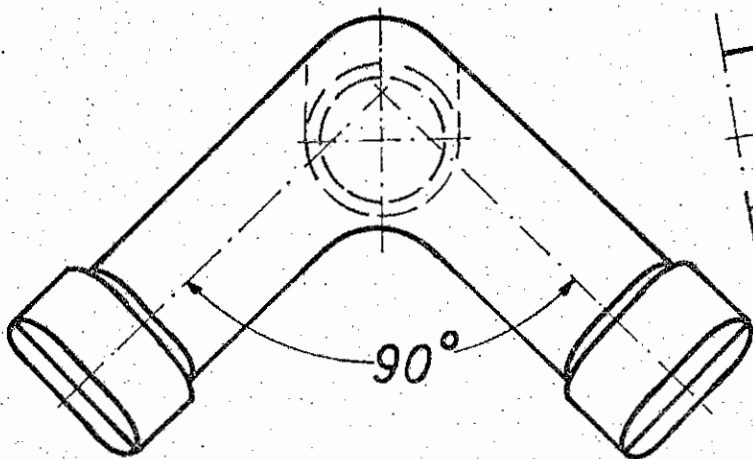
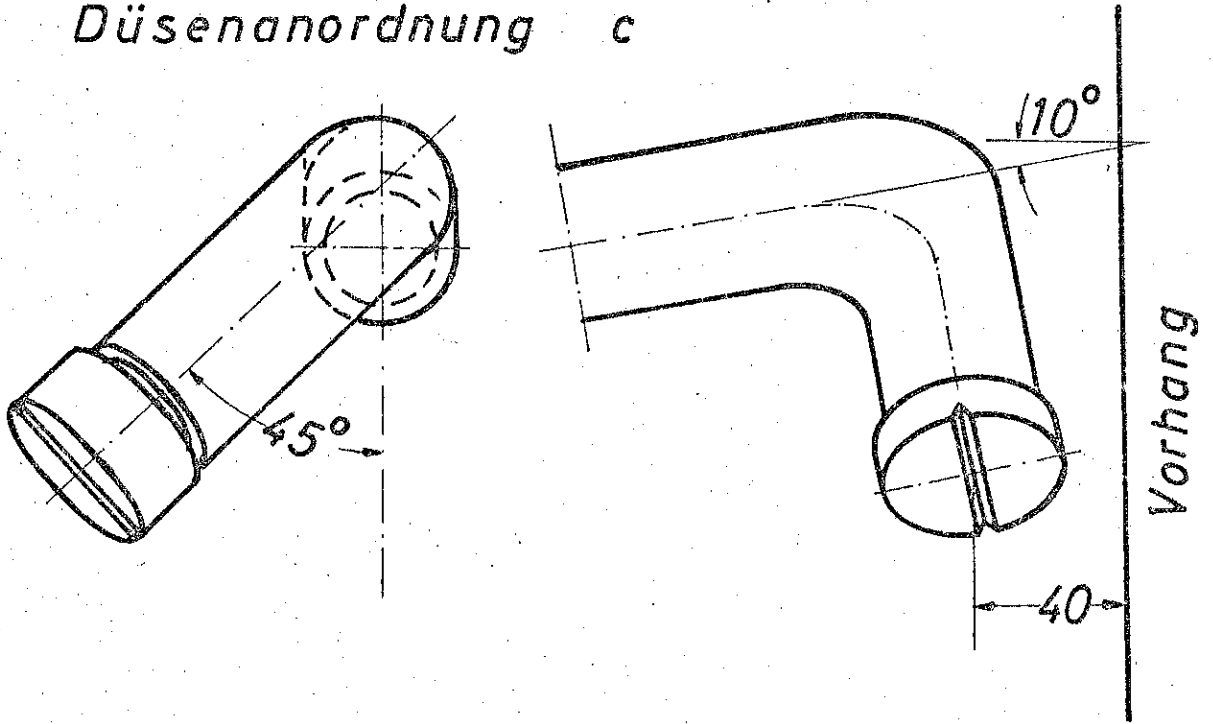


Bild 8a Anordnung der Düsen zum Berieseln des Vorhanges

### Düsenanordnung c



### Düsenanordnung d

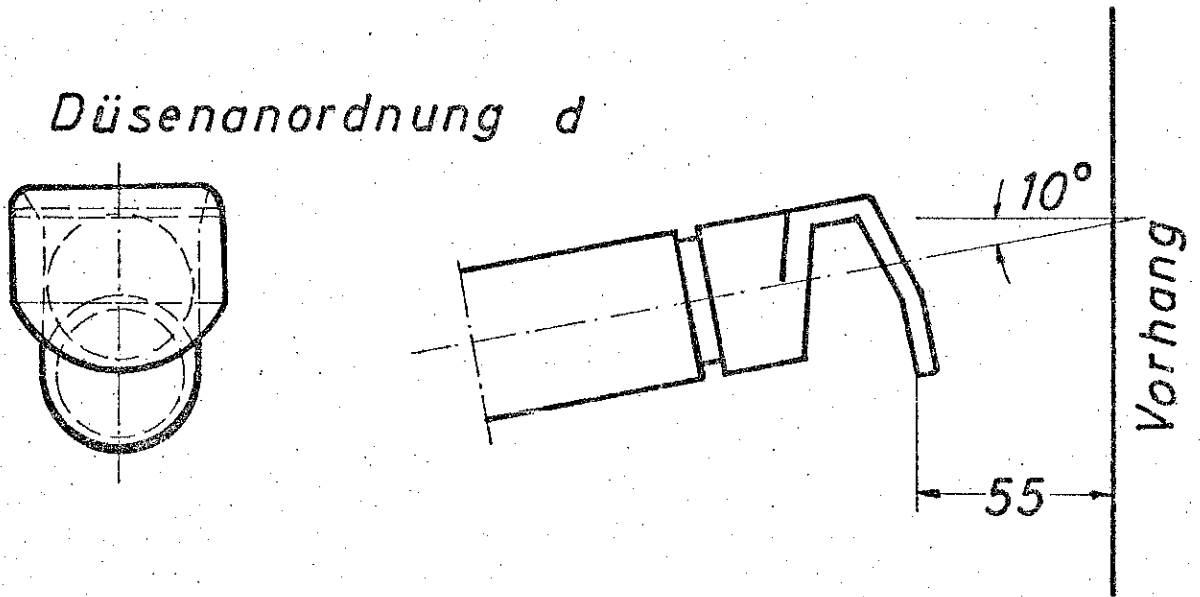


Bild 8b Anordnung der Düsen zum Berieseln des Vorhanges

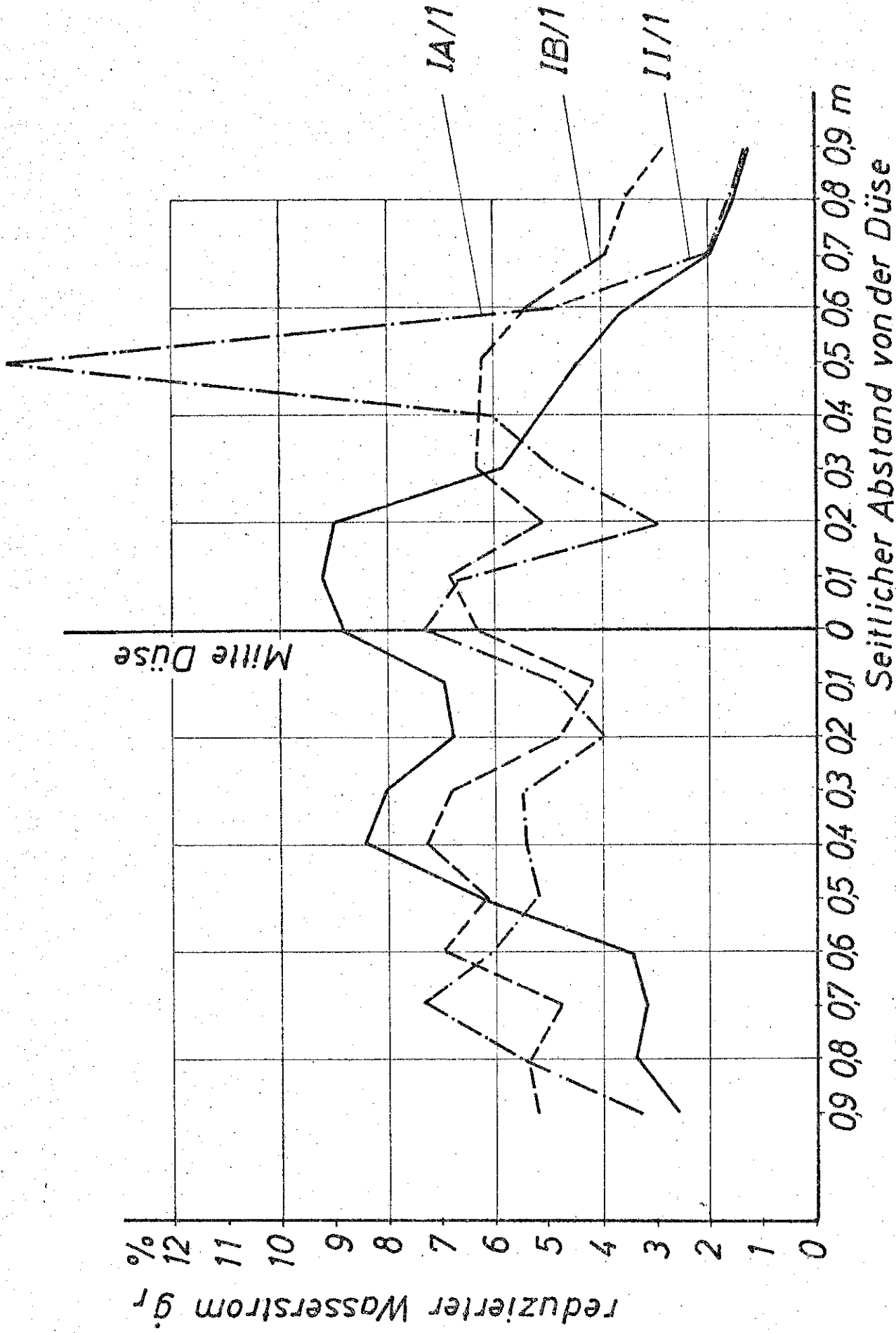


Bild 9 Verteilung der Berieselungsdichte bei der Düsenanordnung a der Typen IA, IB und II

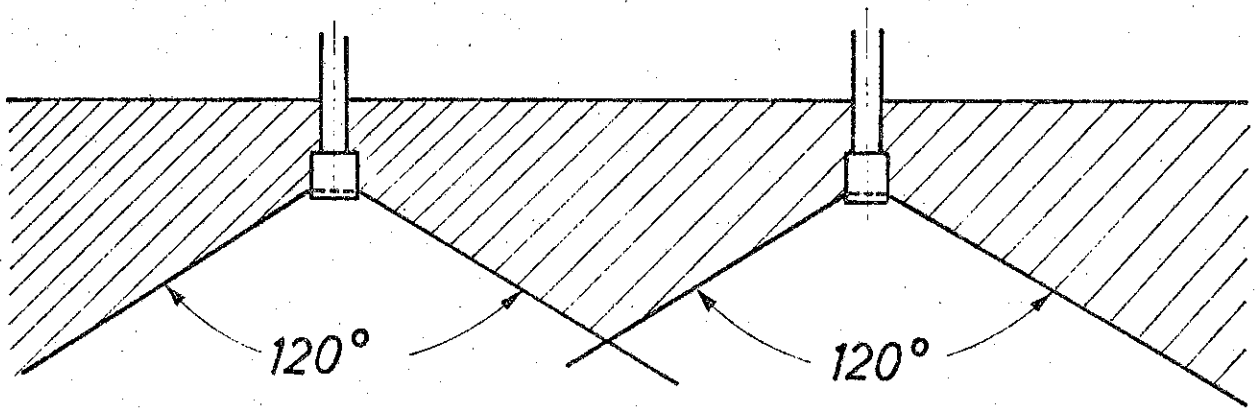


Bild 10 Nicht besprühte Zone bei der Düsenanordnung a für Düsen mit  $120^\circ$  Sprühwinkel

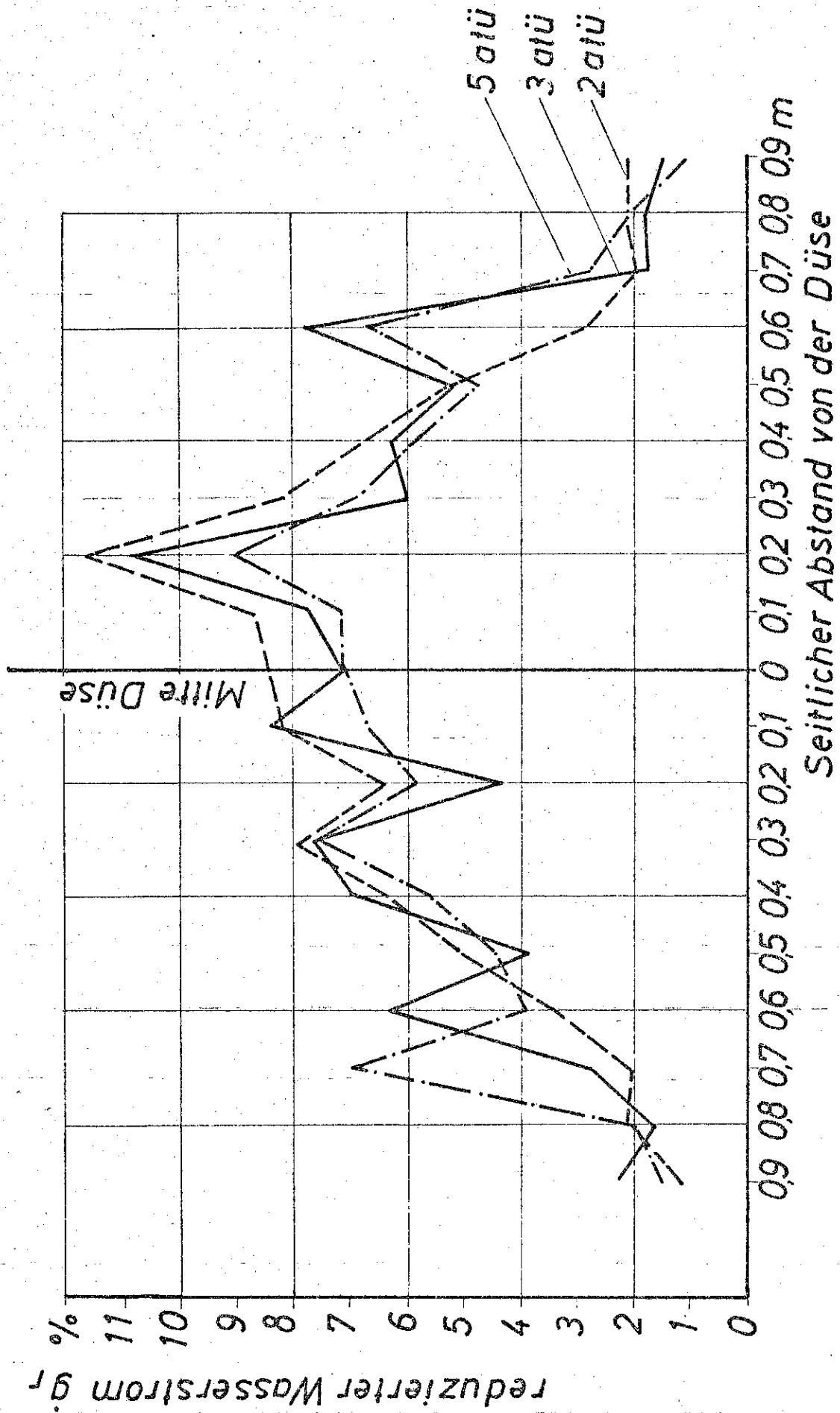


Bild 11 Verteilung der Berieselungsdichte der Düse II/2 bei der Anordnung b für 3 Drücke vor der Düse



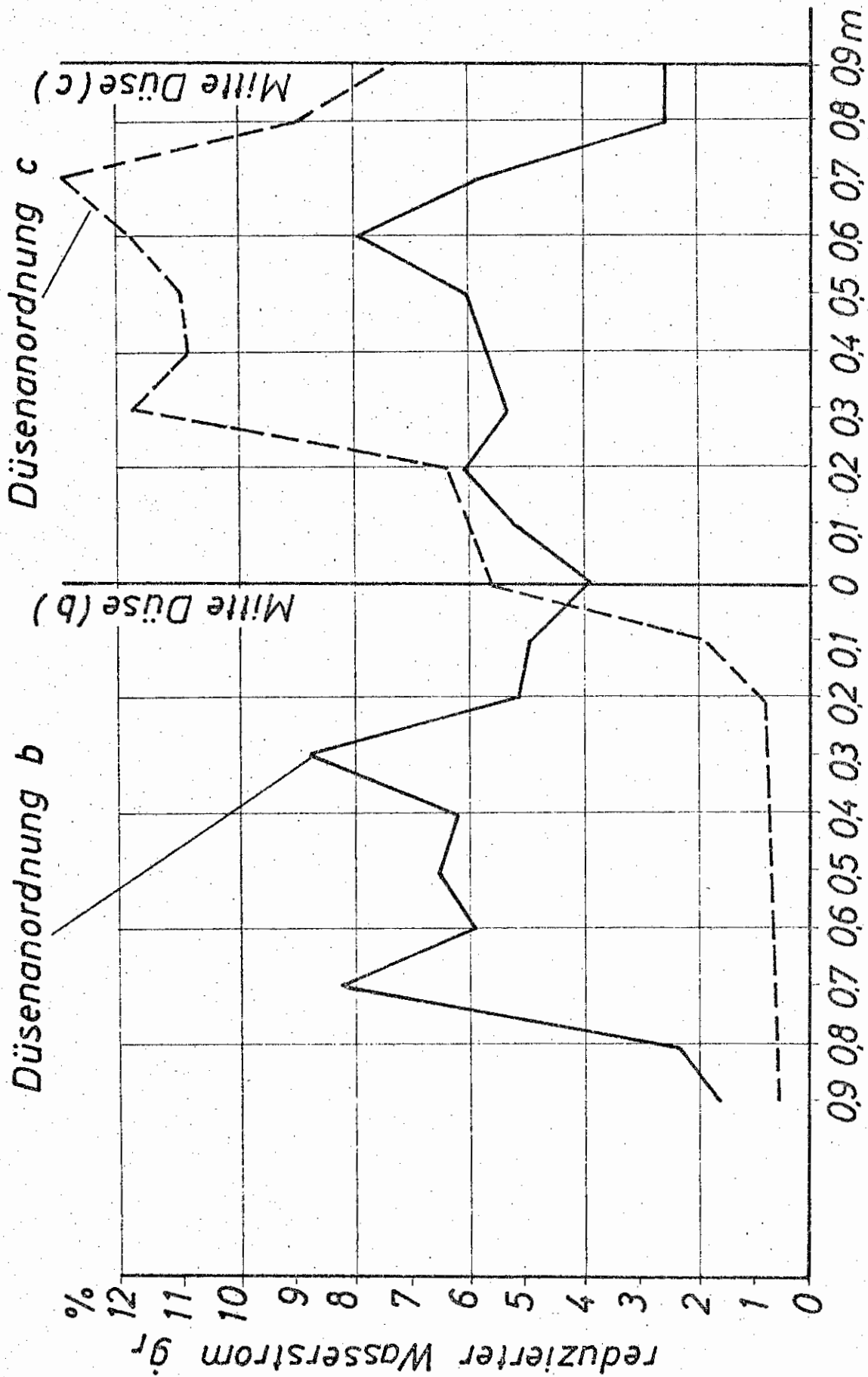


Bild 12 Verteilung der Berieselungsdichte bei 3 atü Druck für die Düse II/1 bei der Anordnung b und c

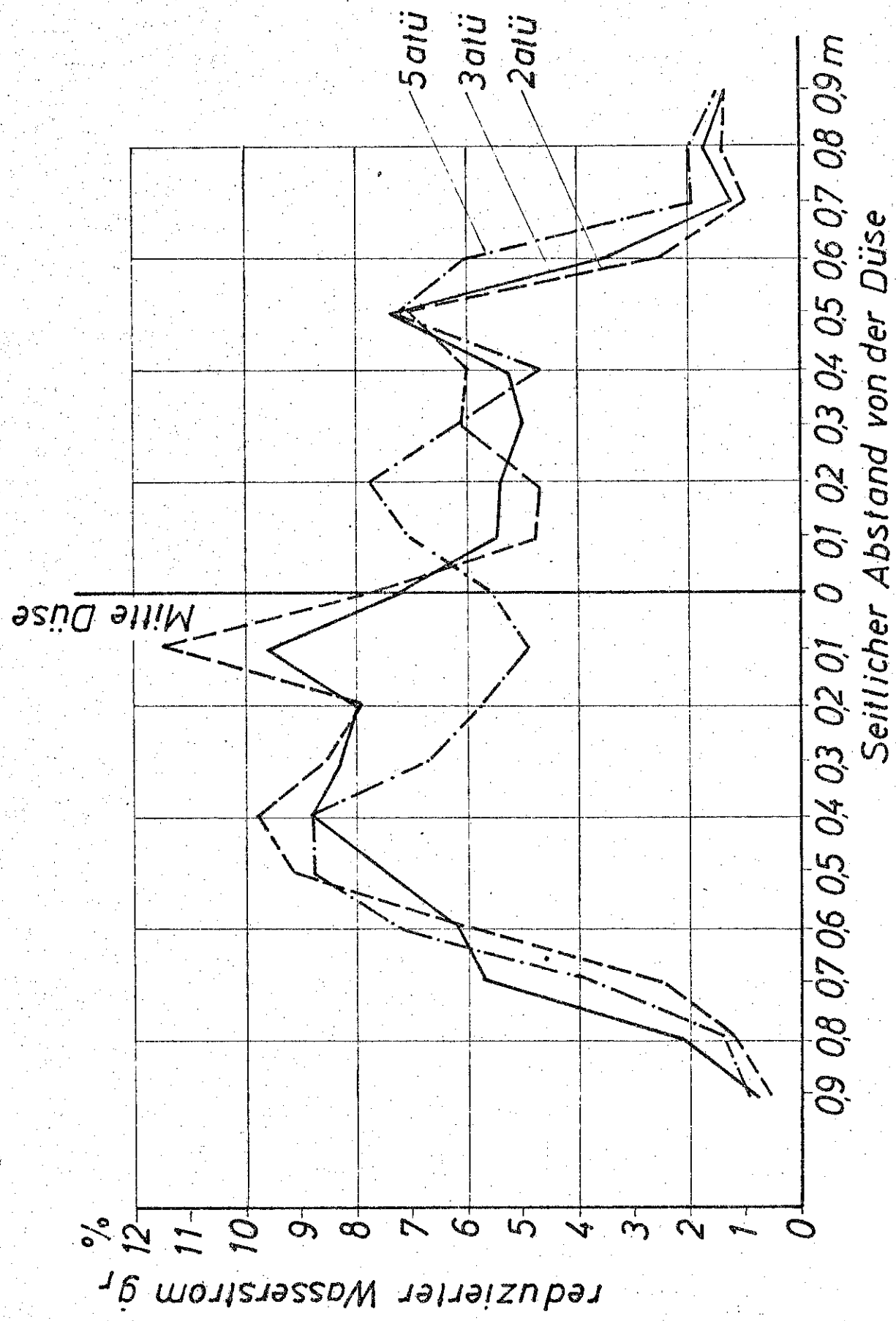


Bild 13 Verteilung der Berieselungsdichte der Düse III/1 bei der Anordnung d für 3 Drücke vor der Düse  
Seitlicher Abstand von der Düse

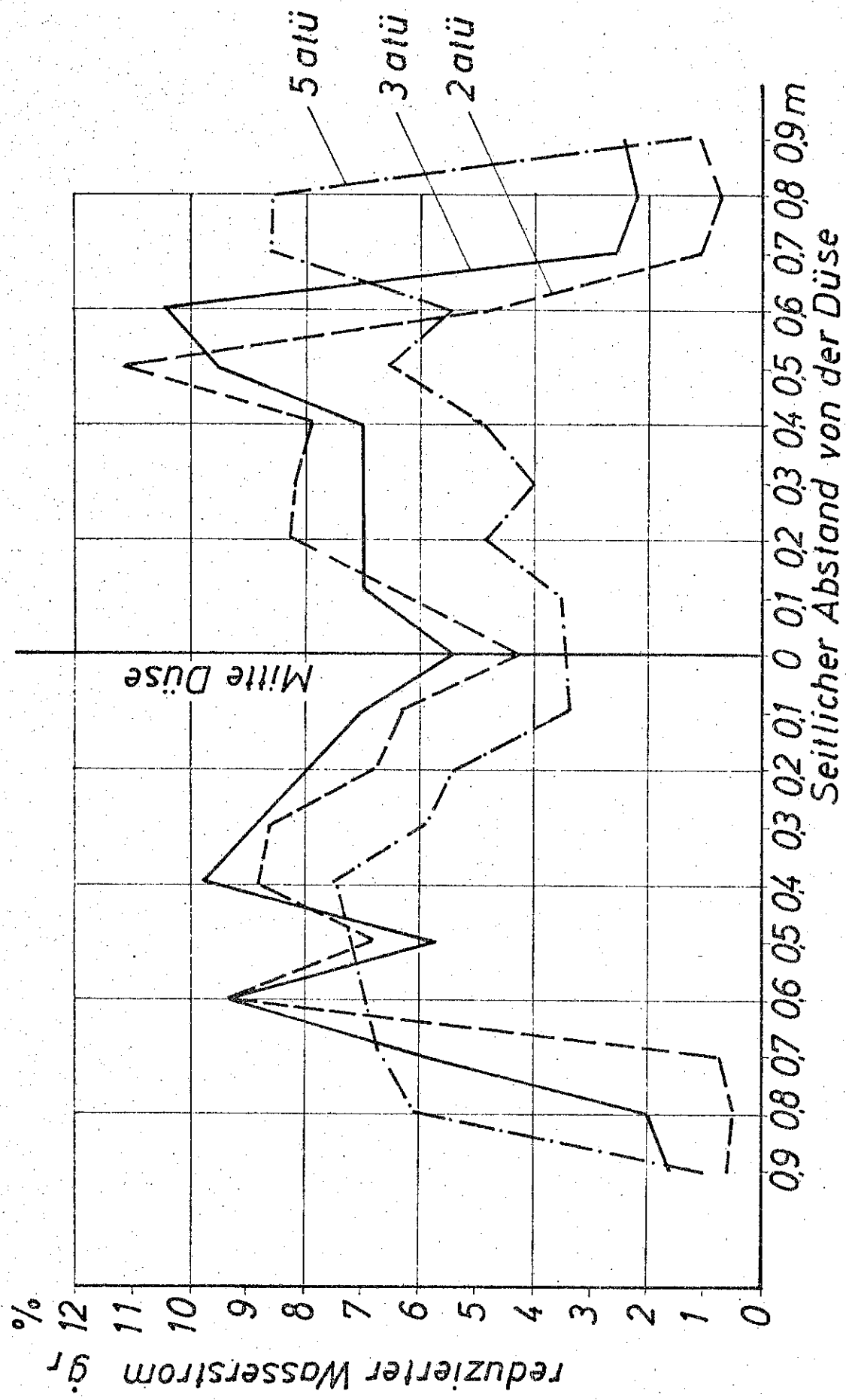
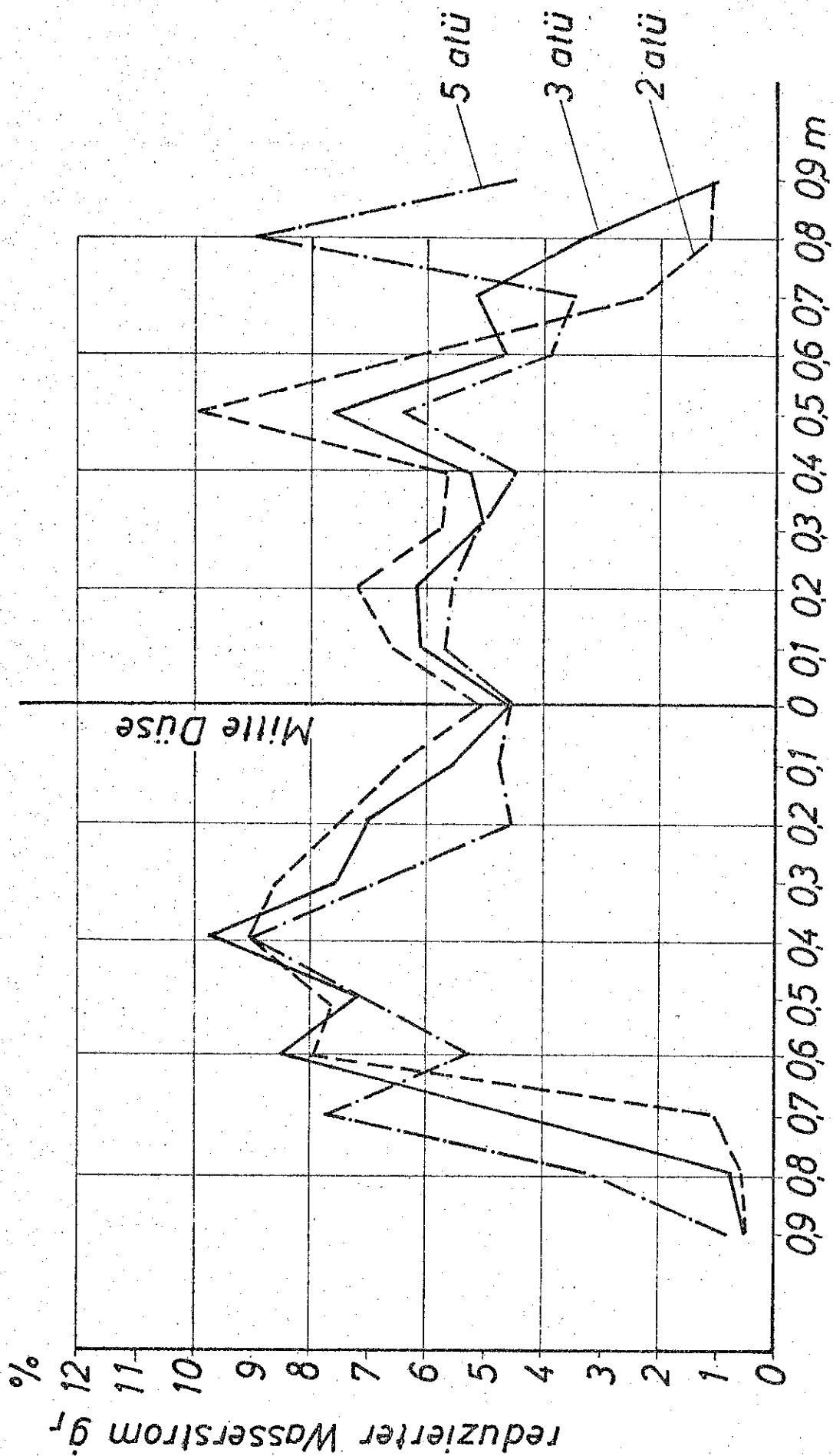


Bild 14 Verteilung der Berieselungsdichte der Düse. III/2 bei der Anordnung  $\delta$  für 3 Drücke vor der Düse



Seitlicher Abstand von der Düse

Bild 15 Verteilung der Berieselungsdichte der Düse III/3 bei der Anordnung d für 3 Drücke vor der Düse

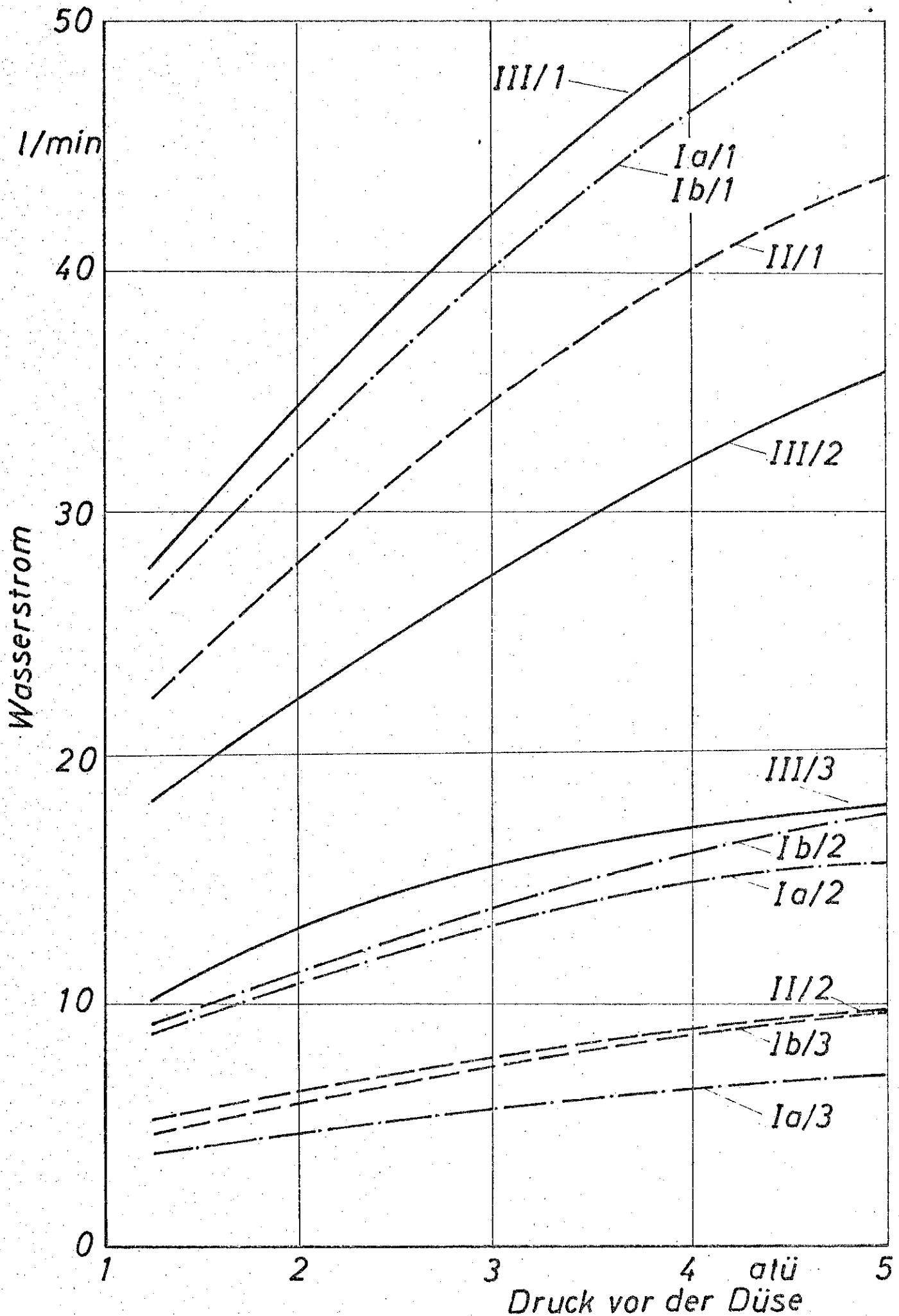


Bild 16 Durchsatz durch die bei den Versuchen eingesetzten Düsen



Bild 17 Von Wassertropfen erfüllten Raum zwischen dem Vorhang und der Strahlwand

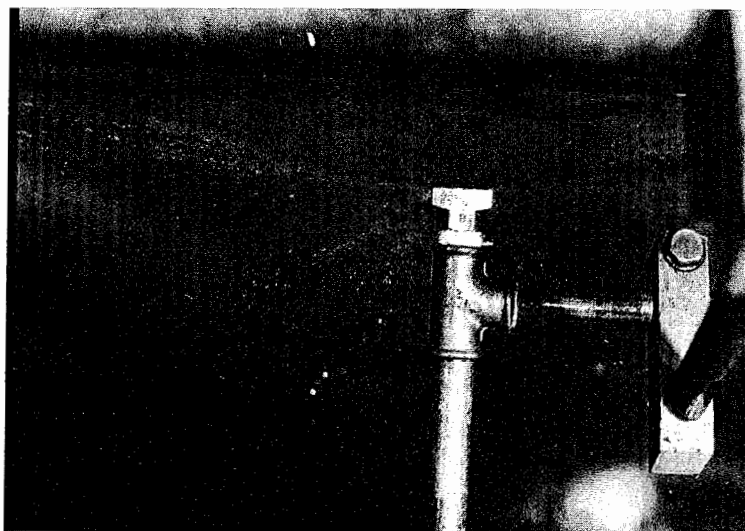
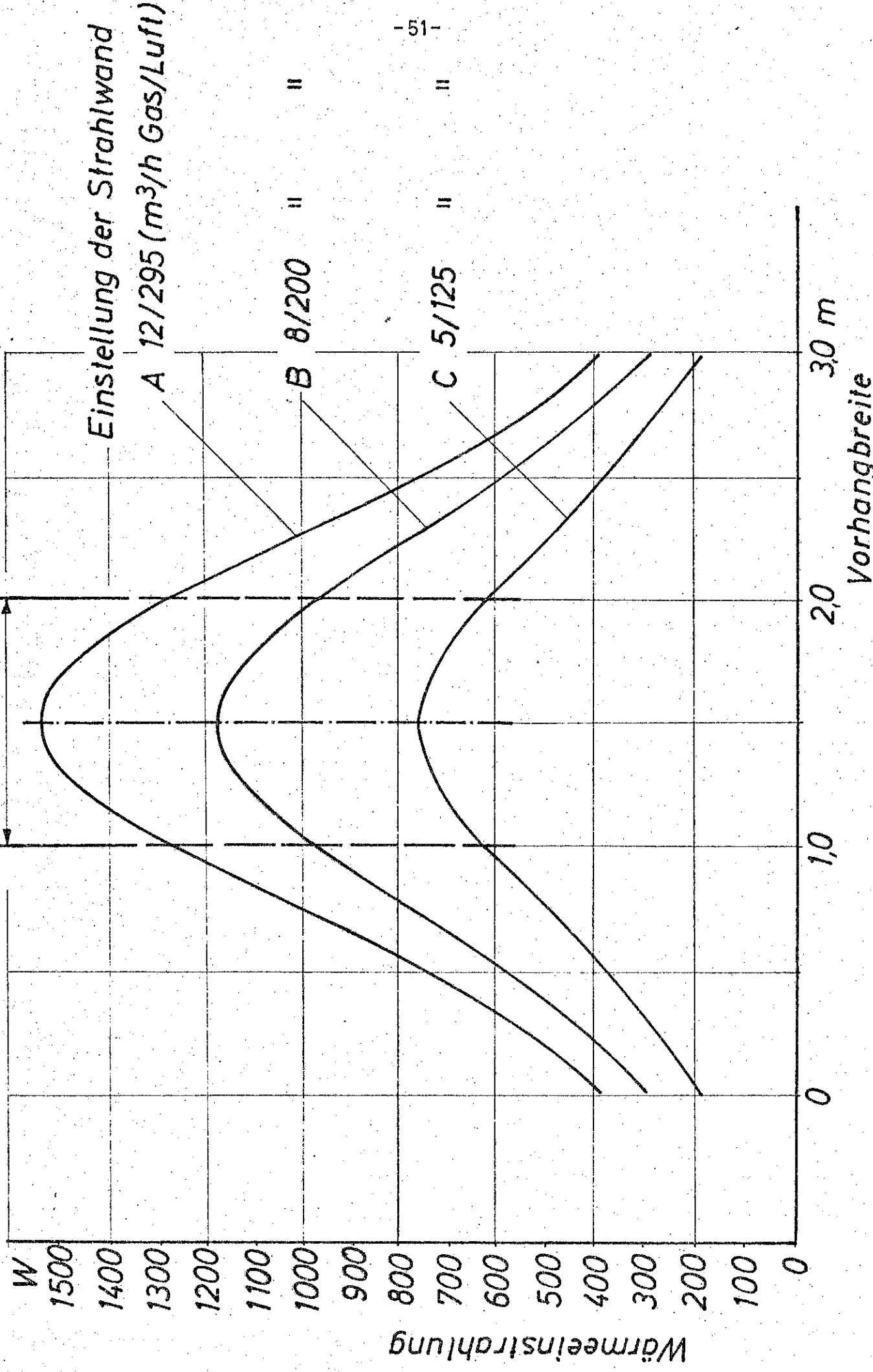


Bild 18 Wasser wird bei dem Düsen-Typ III nicht nur an den Vorhang, sondern auch in die entgegengesetzte Richtung gesprüht



Einstellung der Strahlwand  
A 12/295 (m<sup>3</sup>/h Gas/Luft)

B 8/200 "

C 5/125 "

Bild 19 Wärmeeinstrahlung auf einen 10 cm breiten Streifen des Vorhanges bei verschiedenen Einstellungen der Strahlwand

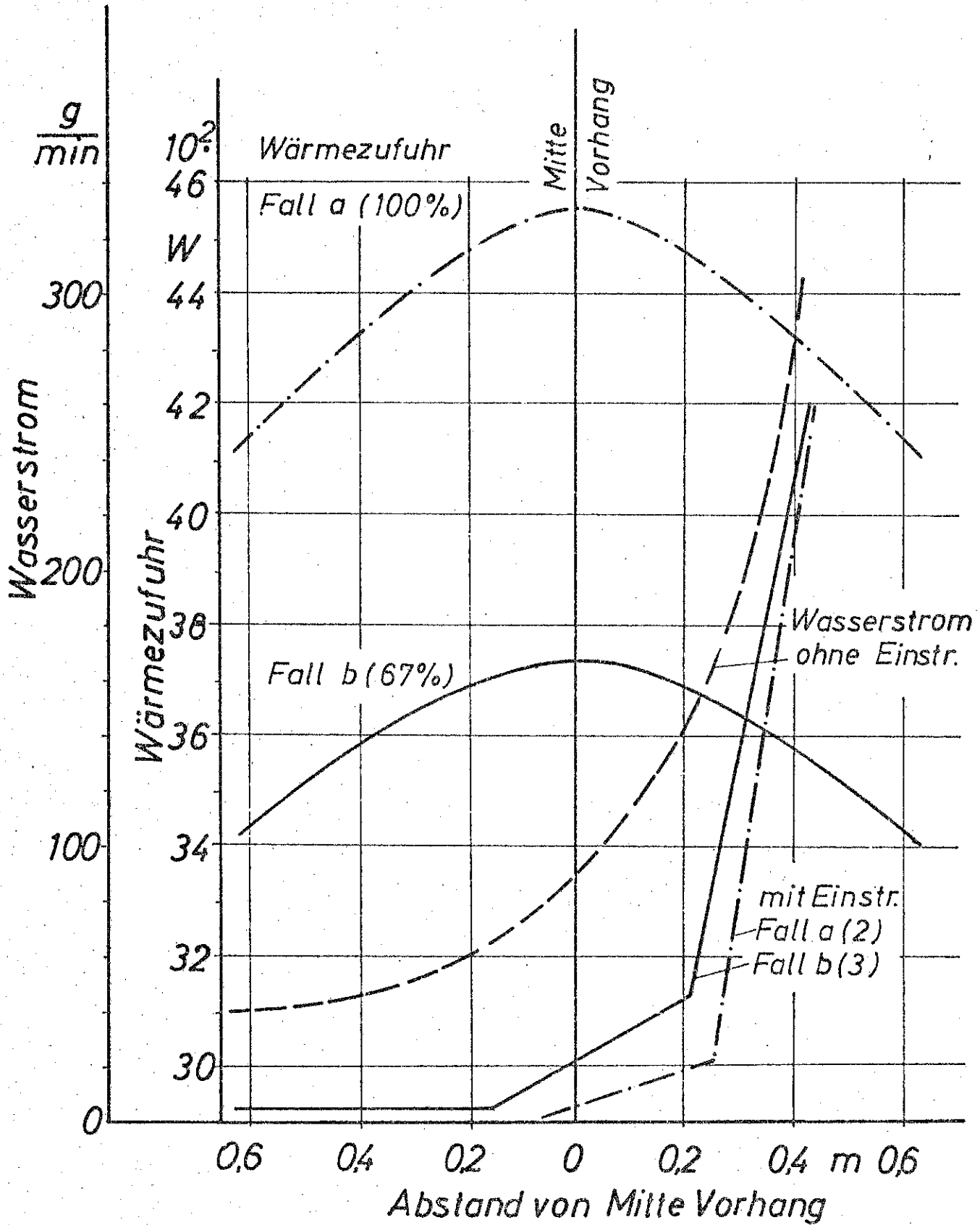


Bild 20 An die einzelnen 10 m breiten Streifen des Vorhanges abgegebene Wärme sowie die unten am Vorhang herabrieselnde Wassermenge



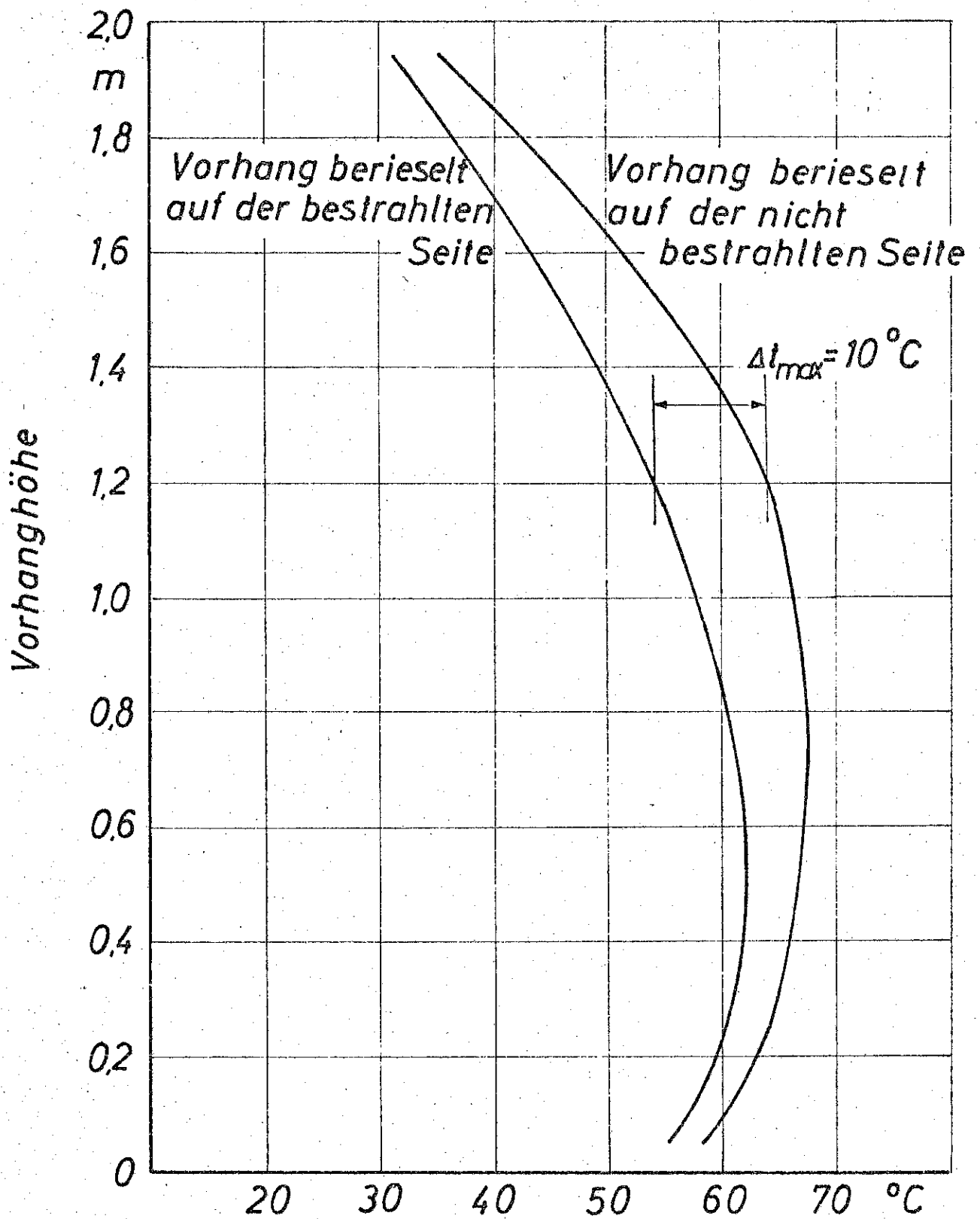


Bild 21 Temperaturverteilung am Vorhang bei einer Berieselung der Vorderseite oder der Rückseite

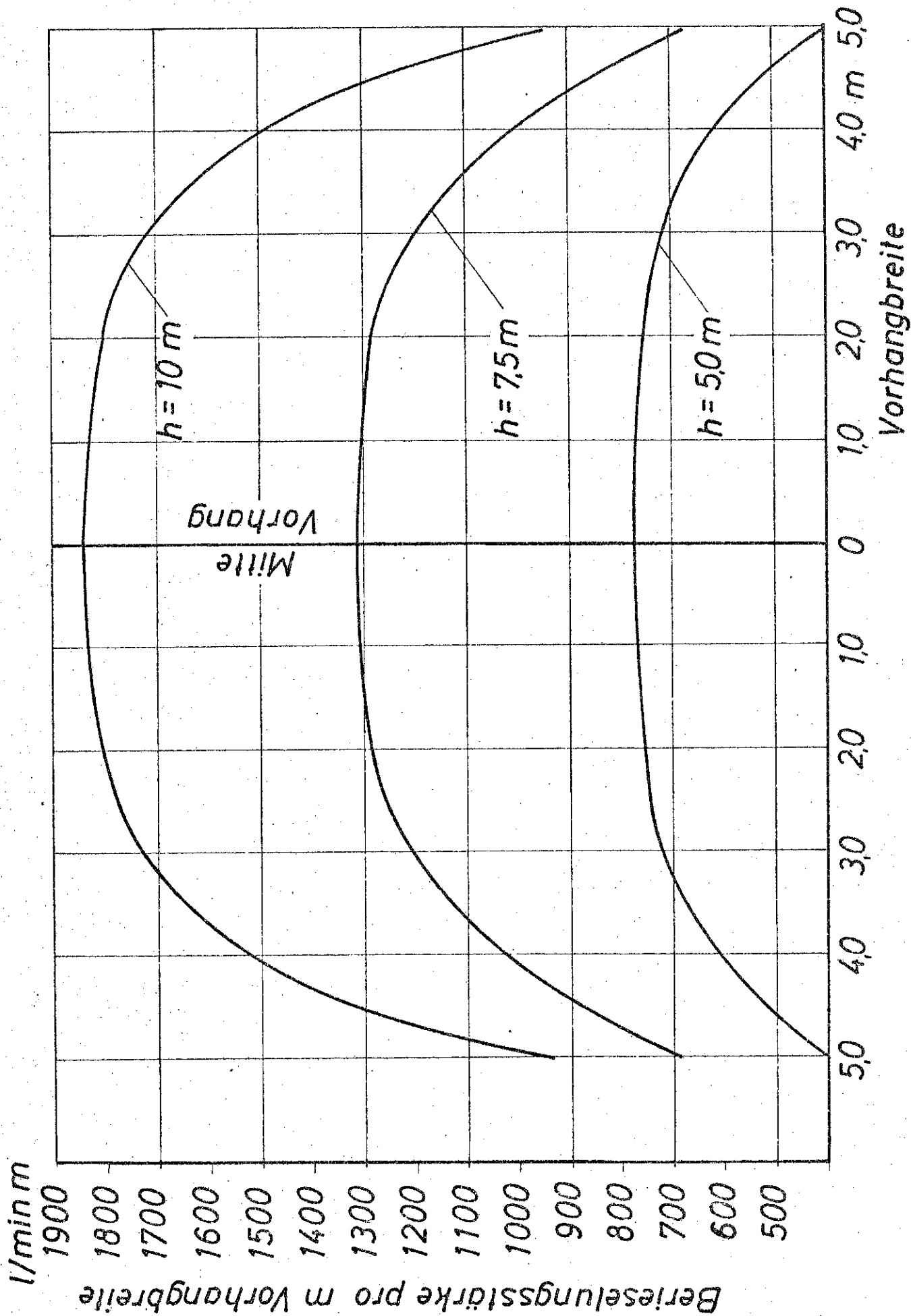


Bild 22 Erforderliche Berieselungsstärke bei einseitiger Berieselung pro m Vorhangbreite für einen 10 m breiten und unterschiedlich hohen Vorhang

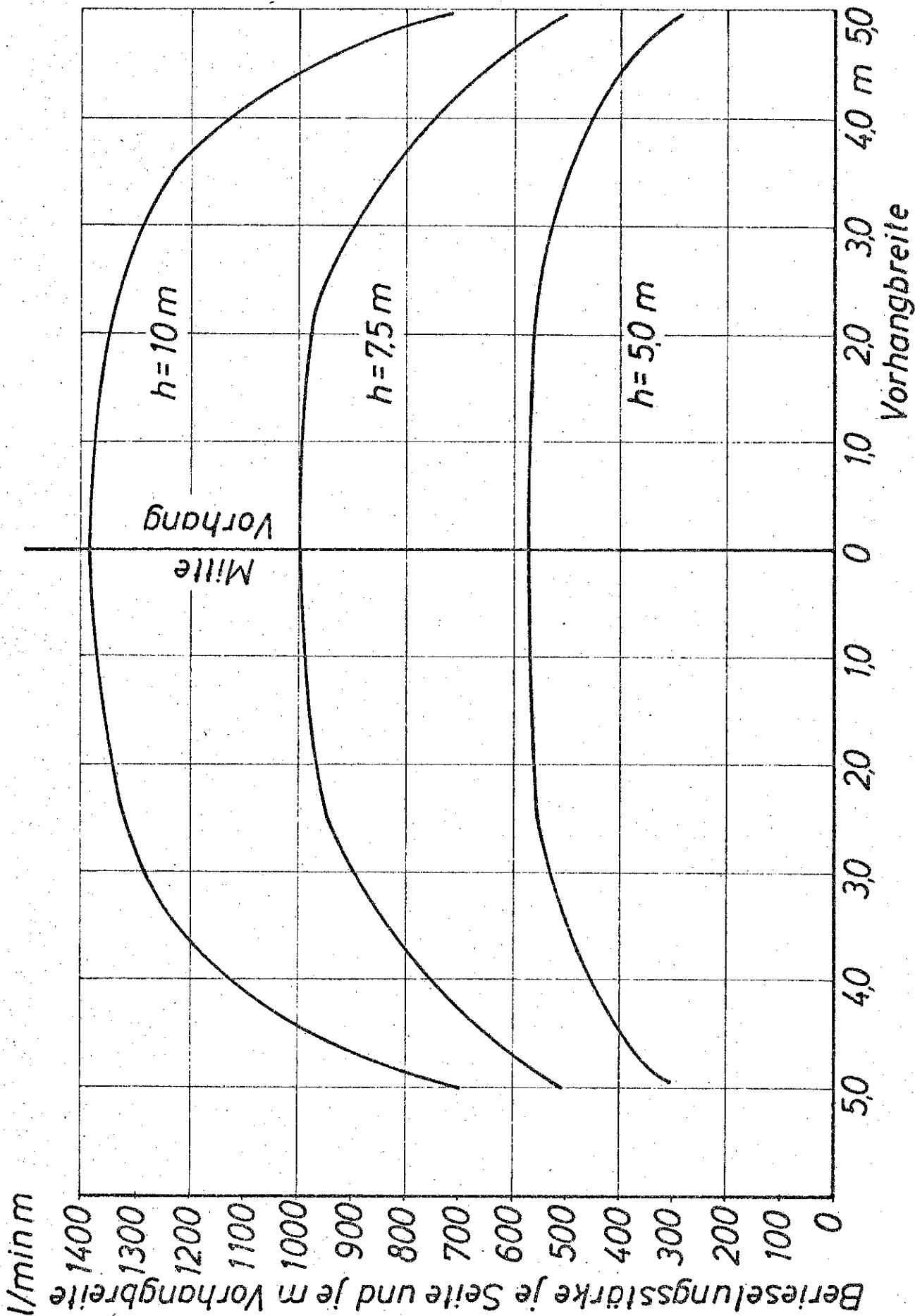


Bild 23 Erforderliche Berieselungsstärke bei beidseitiger Berieselung pro Seite und  $m$  für einen  $10\ m$  breiten und unterschiedlich hohen Vorhang