

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind
Teil 8: Simulation der Wechselwirkungen
eines Tropfenschwarmes mit einer
Heißgasströmung

80

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – UNTERAUSSCHUSS "FEUERWEHRANGELEGENHEITEN"

Forschungsbericht Nr. 80

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 8: Simulation der Wechselwirkungen
eines Tropfenschwarmes mit einer
Heißgasströmung.

von
Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Dezember 1991

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
FORMELZEICHEN	1
1. EINLEITUNG	3
2. ALLGEMEINE BESCHREIBUNG DES PROBLEMS	5
3. BESCHREIBUNG DER MODELLRECHNUNG	6
4. RANDBEDINGUNGEN UND ANNAHMEN FÜR DIE BERECHNUNGEN	10
5. ERGEBNISSE DER BERECHNUNGEN FÜR EINEN MONOSCHWARM	12
5.1 TROPFENBILANZEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN RANDBEDINGUNGEN	12
5.1.1 HÖHE DES SPRINKLERS ÜBER DEM BRANDHERD : 3 m VOLUMENSTROM : 60 l/min	12
5.1.2 HÖHE DES SPRINKLERS ÜBER DEM BRANDHERD : 3 m VOLUMENSTROM : 90 l/min	13
5.1.3 HÖHE DES SPRINKLERS ÜBER DEM BRANDHERD : 4 m VOLUMENSTROM : 60 l/min	14
5.1.4 HÖHE DES SPRINKLERS ÜBER DEM BRANDHERD : 4 m VOLUMENSTROM : 90 l/min	14
5.2 VERGLEICH DER BERECHNUNGEN	15
5.2.1 MASSENANTEIL DER TROPFEN, DER DEN SPRINKLER ERREICHT	15
5.2.2 MASSENANTEIL DER TROPFEN, DER DIE F/R-GRENZE ÜBERSCHREITET	17
5.2.3 MASSENANTEIL DER TROPFEN, DER DEN BRANDHERD ERREICHT	20
5.2.4 MASSENANTEIL DER TROPFEN, DER VERDAMPFT	24
5.3 WÄRMEABSORPTION DURCH DEN TROPFENSCHWARM WÄHREND DER BEWEGUNG DURCH DEN F/R-BEREICH	25
6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	27
7. LITERATURVERZEICHNIS	29
8. BILDER	34

FORMELZEICHEN

A_B	Brandherdquerschnittsfläche
$D_{Tr, Mono, 0}$	Tropfendurchmesser des Monoschwarmes am Sprinkleraustritt
$D_{Tr, Poly, i, 0}$	Tropfendurchmesser der Fraktion i des Polyschwarmes am Sprinkleraustritt
$\Delta Y_{Tr, 0}$	$Y_{Tr, 0, au} - Y_{Tr, 0, in}$
$Y_{Tr, 0}$	Einsprühwinkel
$Y_{Tr, 0, au}$	Äußerer Winkel des Sprühkegels
$Y_{Tr, 0, in}$	Innerer Winkel des Sprühkegels
k_{Flug}	Unterteilung des Sprühkegels
k_{Umf}	Unterteilung des Sprühkegelumfanges
\dot{m}	Massenstrom aus der Sprinklerdüse
$m_{Tr, Mono, 0}$	Masse des Tropfens eines Monoschwarmes am Sprinkleraustritt
$m_{Tr, Poly, i, 0}$	Masse des Tropfens i eines Polyschwarmes am Sprinkleraustritt
n_{Flug}	Tropfenanzahl pro Flugbahn und Löschzeit-schrittweite für den Monoschwarm
$n_{Flug, Umf}$	Tropfenanzahl pro Flugbahn und Löschzeit-schrittweite über dem gesamten Sprüh-kegelumfang für den Monoschwarm
$n_{Flug, i}$	Tropfenanzahl pro Flugbahn und Löschzeit-schrittweite der Fraktion i eines Poly-schwarmes
$n_{Flug, Umf, i}$	Tropfenanzahl pro Flugbahn und Löschzeit-schrittweite über dem gesamten Sprühkegel-umfang der Fraktion i eines Polyschwarmes
$\dot{n}_{Tr, Mono}$	Tropfenstrom aus dem Sprinkler beim Mono-schwarm
$n_{Tr, Mono}$	Anzahl der in der Löschzeitschrittweite HII ausgesprühten Tropfen beim Monoschwarm
$\dot{n}_{Tr, Poly, i}$	Tropfenstrom der Fraktion i aus dem Sprinkler beim Polyschwarm
$n_{Tr, Poly, i}$	Anzahl der in der Löschzeitschrittweite HII ausgesprühten Tropfen der Fraktion i beim Polyschwarm

S	Symbol für den Sprinkler
Δt	Löschzeitschrittweite
T_{Gx}	Gastemperatur in horizontaler Richtung
T_{Gz}	Gastemperatur in vertikaler Richtung
u_{Gx}	Horizontales Profil der Gasgeschwindigkeit
u_{Gz}	Vertikales Profil der Gasgeschwindigkeit
V_{Zyl}	Volumen des Zylinders
x	Horizontale Koordinate
x_B	Radius des Brandherdes
$x_{Tr,i}$	Massenanteil der Tropfen der Fraktion i aus dem Sprinkler
z	Vertikale Koordinate
z_B	Höhe des Zylinders

1. EINLEITUNG

Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) befaßt sich in einem mehrjährigen Forschungsprogramm mit der qualitativen, aber insbesondere quantitativen Beschreibung der Brandausbreitung und dem Löscheinsatz bei gestapelten brennbaren Stoffen.

Als vorbeugende Brandschutzmaßnahmen werden in der Praxis ortsfeste Löschanlagen installiert, wobei als häufigstes Löschmittel Wasser verwendet wird.

Die bisherigen Forschungsarbeiten an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik befaßten sich bezüglich der Brandausbreitung mit einer Literaturlauswertung des in- und ausländischen Schrifttums /1/ sowie der Durchführung von Großbrandversuchen /2,3,4,5,6/. Der zugehörige Löscheinsatz wird in den Arbeiten von Schatz /7,8,9,10,11,12,13/ untersucht.

Die Arbeit von Schatz und Kunkelmann /13/ enthält eine Literaturlauswertung über den Abbau eines einzelnen Wassertropfens durch Verdampfen in einer realen Brandbedingungen entsprechenden Heißgasströmung sowie dessen numerische Simulation. Hierbei wird die Anfangsgeschwindigkeit des Tropfens sowie dessen Einsprühwinkel vorgegeben und als Rauchgasströmung eine über einer Wärmequelle entstehende, nach oben gerichtete freie Konvektionsströmung angenommen. Der Tropfenabbau wird durch das Lösen der Wärme-, Stoff- und Impulsbilanzen am Einzeltropfen unter Zugrundelegung der für das System relevanten Anfangs- und Randbedingungen berechnet. In der Praxis ist die aus einer Sprinkleranlage austretende Löschwassermenge und die räumliche Verteilung des bei der Versprühung entstehenden Tropfenschwarmes ebenso wie die Tropfengröße und der Anfangsimpuls der Tropfen für den Löscherfolg ausschlaggebend. In /14/ wird ein über die Angaben in /13/ weiterführender Literaturüberblick gegeben, der sich mit dem Wärme-, Stoff- und Impulsaustausch des Tropfenschwarmes beschäftigt. Weiterhin werden Literaturstellen aufgeführt, die sich mit den Gesetzmäßigkeiten

für die Wechselwirkungen innerhalb eines Tropfenschwarmes beschäftigen. Diese Arbeit stellt eine Weiterführung der Untersuchungen in /14/ in Form einer numerischen Simulation dar. Es ist hierbei das Ziel, die Problematik der Wechselwirkungen eines aus einem Sprinkler austretenden Tropfenschwarmes mit dem Brand näher zu untersuchen.

2. ALLGEMEINE BESCHREIBUNG DES PROBLEMS

Die Literaturlauswertung in /14/ hat gezeigt, daß es sich hierbei um sehr komplexe Wechselwirkungen innerhalb des Systems Sprinkler/Brand handelt, die in den einzelnen Arbeiten nur zum Teil oder nur qualitativ erfaßt werden. Während des Löschvorganges laufen 3-dimensionale instationäre Wärme-, Stoff- und Impulstransportprozesse zwischen den Wassertropfen und der kontinuierlichen Phase, dem Rauchgas/Luftgemisch, ab. Durch den Zerstäubungsvorgang wird ein Tropfenspektrum erzeugt, das durch einen mittleren Tropfendurchmesser nur bedingt beschrieben werden kann. Dieses Tropfenspektrum ändert sich während des Wärme-, Stoff- und Impulsaustausches mit der Rauchgasströmung. Innerhalb des Tropfenschwarmes ergeben sich Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Tropfen, die bisher quantitativ noch nicht untersucht worden sind. Hier sei besonders der Impulsaustausch beim Zusammenstoß erwähnt. Durch das Einsprühen kommt es zu einer mehr oder weniger starken Beeinflussung der Rauchgasströmung, welche wiederum eine Rückwirkung auf das Spray hat. Die hierdurch hervorgerufene Änderung der Relativgeschwindigkeit hat einen Einfluß auf die jeweiligen Kennzahlen des Wärme-, Stoff- und Impulstransportes. Die Verdunstung und die Verdampfung der Wassertropfen erhöhen die Feuchtigkeit der umgebenden Luft bzw. des Rauchgases. Dieses hat ebenfalls einen Einfluß auf die Wärme-, Stoff- und Impulsbilanzen, u.a. durch Änderung des Konzentrationsgradienten zwischen Tropfen und Umgebung sowie durch die Veränderung der Stoffwerte, vor allem auf der Gasseite. Je nach Rauchgastemperatur wird der entstehende Dampf mehr oder weniger stark überhitzt. Dieser überhitzte Dampf trägt neben dem Rauchgas zur Aufheizung der Tropfen und des noch nicht überhitzten Dampfes und der kälteren Luft bei. Die Ventilationsbedingungen im Raum haben ebenfalls einen erheblichen Einfluß auf das System Sprinkler/Brand.

3. BESCHREIBUNG DER MODELLRECHNUNG

Für die rechnerische Simulation wurde versucht, ein Modell zu entwickeln, mit dessen Hilfe es möglich ist, diese komplizierte Problematik zu beschreiben. Bei einer rechnerischen Simulation müssen zum einen wegen bisher quantitativ nicht erfaßbarer Einflußgrößen, zum anderen zur Begrenzung der Rechenzeit und der Anforderungen an die Speicherkapazität der EDV-Anlage Vereinfachungen getroffen werden.

Bild 1 zeigt das entwickelte Modell und Bild 2 das dazugehörige Flußdiagramm zur numerischen Simulation. Bei Löschanfang verläßt ein vorgegebener Massenstrom \dot{m} die Sprinklerdüse. Hieraus ergibt sich der Tropfenstrom in Tropfen pro Zeiteinheit für einen Monoschwarm, bei dem alle Tropfen den gleichen Tropfendurchmesser $D_{Tr, Mono, 0}$ und die Masse $m_{Tr, Mono, 0}$ (Annahme: kugelförmiger Tropfen) aufweisen, zu

$$\dot{n}_{Tr, Mono} = \frac{\dot{m}}{m_{Tr, Mono, 0}} \quad (1)$$

Die Tropfenzahl für die im Programm verwendete Löschanzeitschrittweite ergibt sich zu

$$n_{Tr, Mono} = \dot{n}_{Tr, Mono} * \Delta t \quad (2)$$

Entsprechend ergibt sich für einen Polyschwarm, der aus i Fraktionen mit dem jeweiligen Tropfendurchmesser $D_{Tr, Poly, i, 0}$ (Tropfenmasse $m_{Tr, Poly, i, 0}$) und dem Massenanteil $x_{Tr, i}$ besteht, zu

$$\dot{n}_{Tr, Poly, i} = \frac{x_{Tr, i} * \dot{m}}{m_{Tr, Poly, i, 0}} \quad (3)$$

bzw.

$$n_{Tr, Poly, i} = \dot{n}_{Tr, Poly, i} * \Delta t \quad (4)$$

Der Sprühkegel des Sprinklers wird nun in der Weise gebildet, daß ein äußerer Einsprühwinkel $\gamma_{Tr, 0, au}$ und ein innerer Einsprühwinkel $\gamma_{Tr, 0, in}$ vorgegeben wird. Durch Wahl des inneren Winkels von 0° ergibt sich ein Vollkegel und entsprechend bei $> 0^\circ$ ein Hohlkegel. Die Differenz zwischen äußerem und innerem Winkel $\Delta\gamma_{Tr, 0}$ wird durch den Faktor k_{Flug} in gleichmäßig verteilte Zwischenwinkel unterteilt. Hierdurch ergeben sich $k_{Flug} + 1$ Einsprühwinkel im Bereich zwischen $\gamma_{Tr, 0, in}$ und $\gamma_{Tr, 0, au}$ für die jeweilige Tropfengröße $D_{Tr, Mono}$ bzw. $D_{Tr, Poly, i}$. Dies beinhaltet die vereinfachende Annahme, daß die Einsprühwinkel unabhängig von der Tropfengröße sind. Des weiteren wird angenommen, daß der Umfangswinkel des Sprühkegels von 360° durch den Faktor k_{Umf} gleichmäßig unterteilt wird. Hierdurch ergibt sich eine Schar von Einsprühwinkeln, zum einen über dem Radius, zum anderen über dem Umfang, über die die Tropfenzahl pro Löschzeitschrittweite gleichmäßig verteilt wird. Hieraus ergibt sich die Tropfenzahl pro Flugbahn und Löschzeitschrittweite für den Monoschwarm zu

$$n_{Flug} = \frac{n_{Tr, Mono}}{(k_{Flug} + 1) * k_{Umf}} \quad (5)$$

Wegen der Annahme der Symmetrie ergibt sich dann die Tropfenzahl für den jeweiligen Winkel $\gamma_{Tr, 0}$ über dem gesamten Umfang zu

$$n_{Flug, Umf} = \frac{n_{Tr, Mono}}{k_{Flug} + 1} \quad (6)$$

Entsprechend ergibt sich für jede Fraktion i des Polyschwarmes

$$n_{\text{Flug},i} = \frac{n_{\text{Tr,poly},i}}{(k_{\text{Flug}} + 1) * k_{\text{Umf}}} \quad (7)$$

sowie

$$n_{\text{Flug,Umf},i} = \frac{n_{\text{Tr,pol},i}}{k_{\text{Flug}} + 1} \quad (8)$$

Aus dem Massenstrom bzw. Volumenstrom und dem Düsendurchmesser des Sprinklers läßt sich die Resultierende der Einsprühgeschwindigkeit ermitteln. Der Tropfenschwarm nach Gleichung (6) bzw. (8) dringt nach Austritt aus der Sprinklerdüse in die Flammen-/Rauchgassäule ein. Diese besteht aus 3 Bereichen:

Bereich I: Flammenzone

- Kennzeichen:
- anhaltende Flammerscheinung
 - beschleunigte Strömung der Gase
 - Maximalwert der Temperatur

Bereich II: flackernde Flammenzone

- Kennzeichen:
- flackernde Flammerscheinung
 - konstante Strömungsgeschwindigkeit
 - Abnahme der Temperatur

Bereich III: Auftriebsbereich

- Kennzeichen:
- Auftrieb der Gase durch Dichteunterschiede
 - Abnahme von Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit

Im Programm bestehen hierbei die Möglichkeiten der Berechnung bei jeweils konstanter Wärmefreisetzung oder durch Eingabe der zeitlichen Zunahme der Abbrandmasse bzw. des zeitlichen Verlaufes der Wärmefreisetzung.

Im Rechenprogramm wird anschließend die gekoppelte Wärme-, Stoff- und Impulsbilanz für den Einzeltropfen gelöst. Auf die

Theorie zur Berechnung der Temperatur- und Geschwindigkeitsprofile der Flammen-/Rauchgassäule in vertikaler und horizontaler Richtung, die Berechnung der Flammen-/Rauchgasgrenze (F/R-Grenze) sowie die Lösung der gekoppelten Wärme-, Stoff- und Impulsbilanz für den Einzeltropfen wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Es wird hierbei auf die Literaturstelle /13/ verwiesen.

Das Ergebnis der Berechnungen stellt eine Tropfenbilanz dar, die eine Aussage darüber macht, welcher Massenanteil bei den vorgegebenen Anfangs- und Randbedingungen den Sprinkler infolge der Auftriebsströmung wieder erreicht, welcher die F/R-Grenze überschreitet und welcher den Brandherd erreicht bzw. verdampft. Wie die Literaturlauswertung gezeigt hat, teilt sich der Massenteil, der hier idealisiert den Sprinkler wieder erreicht, in der Realität weiter auf. Zum einen erreicht ein Teil dieser Tropfen wirklich die Decke und trägt zu deren Kühlung bei. Ein weiterer Anteil der aufsteigenden Tropfen vereinigt sich mit Tropfen, die sich abwärts bewegen, zu größeren Tropfen und kehrt seine Bewegungsrichtung aufgrund der Vergrößerung der Masse wieder um. Der dritte Teil wird aus dem F/R-Bereich ausgetragen. Über dieses Tropfenverhalten liegen bisher jedoch nur qualitative Aussagen in der Literatur vor.

Der im Programm betrachtete Zeitabschnitt, in dem das Tropfenverhalten untersucht wird, dauert dabei solange, bis die einzelnen Tropfenfraktionen eine der obengenannten Grenzen, wie 'Erreichen des Sprinklers', 'Überschreiten der F/R-Grenze', 'Erreichen des Brandherdes' oder 'Verdampfung im F/R-Bereich', erreicht haben. Der Verdampfungsvorgang nach Erreichen des Brandherdes wird nicht betrachtet.

Die bei der Berechnung ermittelte verdampfte Wassermasse und die absorbierte Wärme durch den Einzeltropfen wird hierbei mit der Tropfenanzahl $n_{\text{Flug, Umf}}$ bzw. $n_{\text{Flug, Umf, i}}$ multipliziert und über der Löschzeit aufsummiert. Das gleiche geschieht bei den anderen Bilanzanteilen. Außerdem wird aus der Wassermasse, die den Brandherd erreicht, eine Wasserbeaufschlagung errechnet. Durch

die Vorgabe der Wärmefreisetzung ergibt sich der Radius des Brandherdes x_B nach /13/. Denkt man sich einen zylindrischen Behälter auf dem Brandherd mit dem Radius x_B , so ergibt sich dessen Volumen, unter Berechnung der Brandherdquerschnittsfläche A_B zu

$$V_{\text{Zyl}} = A_B * z_B = \pi * x_B^2 * z_B \quad (9)$$

Hieraus ergibt sich die Höhe z_B zu

$$z_B = \frac{V_{\text{Zyl}}}{\pi * x_B^2} \quad (10)$$

Das Volumen V_{Zyl} ergibt sich hierbei aus den aufsummierten Volumina der Tropfen, die den Brandherd erreichen. Bei den in dieser Arbeit diskutierten Berechnungsergebnissen wird eine jeweils konstante Wärmefreisetzung vorausgesetzt und da für jeden Tropfenschwarm, der den Sprinkler pro Zeiteinheit verläßt, die gleichen Randbedingungen auch bezüglich Rauchgastemperatur, Rauchgasgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit gelten, ist diese errechnete Wasserbeaufschlagung zeitlich konstant. In den Ergebnissen wird jeweils die Wassermenge betrachtet, die in einer Minute den Brandherd erreicht. Gleichung (10) erhält hierdurch die Einheit Höhe/Zeit.

4. RANDBEDINGUNGEN UND ANNAHMEN FÜR DIE BERECHNUNGEN

Vorerst wurde den Berechnungen nur ein Monoschwarm zugrundegelegt, das heißt der Tropfenschwarm weist einen einheitlichen Tropfendurchmesser auf und der Massenanteil beträgt für jede Tropfengröße 100 %. Hierbei wurden die Tropfendurchmesser 0,2 mm, 0,5 mm, 1,0 mm, 2,0 mm und 4,0 mm untersucht. Wie die Literatúrauswertung gezeigt hat, kann die Tropfengröße von 1,0 mm als mittlerer Durchmesser für die näherungsweise Beurteilung des Sprühnebels eines Standard-Sprinklers herangezogen werden. Auf einen Polyschwarm mit unter-

schiedlichen Tropfengrößen und unterschiedlichen Massenanteilen wird hier nicht eingegangen, da zum einen zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch kein exakt ermitteltes Tropfenspektrum für die an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik bei den Lagerbrandversuchen verwendeten Sprinkler vorliegen. Zum anderen besteht rechentechnisch das Problem, daß die Fraktionen der jeweiligen Tropfengrößen im Programm nacheinander abgearbeitet werden. Dies spielt zwar bei der Berechnung der Tropfenbilanz, um eine Aussage treffen zu können, welcher Massenanteil der Tropfen wieder zum Sprinkler umkehrt, welcher die F/R-Grenze überschreitet und welcher den Brandherd erreicht, vor allem in den ersten Zeitschritten keine entscheidende Rolle, jedoch kann dies bei den Verdampfungsvorgängen nicht mehr vernachlässigt werden. Die Verdampfungsvorgänge der verschiedenen Tropfenfraktionen laufen in der Realität nicht nacheinander, sondern parallel ab. Wie sich gezeigt hat, verdampfen kleine Tropfen mit z.B. 0,2 mm oder 0,5 mm Durchmesser in relativ kurzer Zeit, dh. werden diese Tropfen im Programm zuerst abgearbeitet, finden die größeren Tropfen eine unrealistisch hohe Luftfeuchtigkeit vor, was sich auf das Ergebnis der Wärme-, Stoff- und Impulsbilanz verfälschend auswirkt. Weiterhin ist der Wert der errechneten absorbierten Wärme zu groß. Für den Stoffaustausch ist der Konzentrationsgradient zwischen Tropfen und Umgebung die treibende Größe. Im Temperaturbereich unter 100° C ist der gesättigte Luftzustand die Grenze für die Verdunstung bzw. Verdampfung. Bei Gastemperaturen über 100° C wird der Dampf überhitzt. Diese Umgebungsbedingungen ändern sich jedoch ständig aufgrund der Rauchgasströmung, des Ansaugens von Luft durch den Brand, durch Einbringen von Luft durch den Sprühkegel und durch die Kraft, mit der das Spray auf die Rauchgasströmung einwirkt und umgekehrt. Durch letzteres wird sowohl die Tropfen- als auch die Gasgeschwindigkeit vermindert. Dadurch ist es sehr schwierig, die Randbedingungen für das jeweilige betrachtete Volumenelement richtig zu charakterisieren. Erst bei Kenntnis dieser Daten ergeben sich sinnvolle Werte für die Betrachtung der Gasseite in Bezug auf Feuchtegehalt, Abkühlung etc. Weiterhin kommt erschwerend hinzu, daß der Temperatur- und Konzentrationsausgleich nicht nur in einer idealisierten be-

grenzten Rauchgassäule stattfindet sondern auch zwischen der kalten Umgebung und dieser Rauchgassäule. In dieser Arbeit wird daher überwiegend die Tropfenseite betrachtet und der Feuchtegehalt der Luft als konstant angenommen. Bei dieser Annahme macht man keinen allzu großen Fehler, wenn man sich auf eine sehr kurze Aktivierungszeit des Sprinklers beschränkt. Dies kommt auch dem entgegen, da das Programm relativ lange Rechenzeiten erfordert.

Als Sprinkler wird ein 1/2"-Sprinkler mit einem Durchsatz von 60 l/min oder 90 l/min angenommen. Der Sprühkegel wird als Vollkegel durch Einsprühwinkel von $\gamma_{Tr,0,in} = 0^\circ$ bis $\gamma_{Tr,0,au} = 75^\circ$ dargestellt. Aus Symmetriegründen ergibt sich daher ein Gesamtwinkel von 150° . Die Zwischenwinkel werden durch 1° -Stufen gebildet.

Zwischen Sprinkler und Brandherd wird eine Höhe von 3 m oder 4 m angenommen in Anlehnung an die bisher an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Brandversuche.

Der Brand wird durch die Diffusionsflamme eines Gasbrenners mit porösem Bett (siehe /13/) simuliert. Die Wärmefreisetzung wird zwischen 100 kW und 2000 kW in 100 kW-Schritten variiert. Hierdurch ergeben sich der Brennerquerschnitt sowie der Radius der Flammen-/Rauchgassäule nach Bild 3.

5. ERGEBNISSE DER BERECHNUNGEN FÜR EINEN MONOSCHWARM

5.1 TROPFENBILANZEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN RANDBEDINGUNGEN

5.1.1 HÖHE DES SPRINKLERS ÜBER DEM BRANDHERD : 3 m

VOLUMENSTROM : 60 l/min

Die Bilder 4.1 bis 4.4 zeigen die Tropfenbilanz für die Höhe 3 m und einen Volumenstrom von 60 l/min für die verschiedenen Tropfendurchmesser in Masseprozenten der eingesprützten Wassermenge als Funktion der Wärmefreisetzung. Es ist zu erkennen,

daß die kleinen Tropfen mit 0,2 mm und 0,5 mm schon bei geringen Wärmefreisetzungen verdampfen. Die Verdampfungsgeschwindigkeit nimmt mit steigender Wärmefreisetzung zu. Diese kleinen Tropfen sind nicht in der Lage, den Brandherd zu erreichen und zum eigentlichen Löschvorgang beizutragen. Der zurückgelegte Flugweg ist aufgrund des geringen Impulses sehr gering. Dies ist auch ein Grund dafür, daß die 0,2 mm-Tropfen die F/R-Grenze nicht überschreiten. 0,5 mm-Tropfen sind bei geringer Wärmefreisetzung aufgrund des etwas größeren Impulses bei Einsprühwinkeln größer 0° zum Teil in der Lage, die F/R-Grenze zu überschreiten. Geringe Wärmefreisetzung bedeutet in diesem Falle eine relativ schlanke F/R-Säule nach Bild 3, die von den Tropfen schon nach relativ kurzem Flugweg überschritten werden kann, sowie eine geringe Auftriebskraft auf die Wassertropfen. Die 'Sprinkler' - Kurve des 0,5 mm-Tropfens zeigt im Gegensatz zum 0,2 mm-Tropfen zunächst einen Anstieg und nach Überschreiten eines Maximums einen Abfall. Dieses liegt daran, daß sich die Tropfenbilanz in diesem Bereich beim 0,5 mm-Tropfen aus 3 Anteilen ('Sprinkler', 'F/R-Grenze', 'Verdampfung') zusammensetzt, wohingegen beim 0,2 mm-Tropfen nur aus 2 Anteilen ('Sprinkler', 'Verdampfung'). Die Berechnungen haben gezeigt, daß Tropfen mit 1 mm Durchmesser nur bei geringen Wärmefreisetzungen in der Lage sind, den Brandherd zu erreichen. Ein gewisser Anteil der 1 mm-Tropfen kehrt aufgrund der Auftriebsströmung zum Sprinkler um. Bei 2 mm- und 4 mm-Tropfen fällt dieser Anteil weg. Erst diese Tropfen tragen wesentlich zur Löschwirkung, d.h. Erreichen des Brandherdes, bei. Die Schwankungen in den Kurvenverläufen, wie z. B. in Bild 4.3 bei 500 kW bei der 'Sprinkler'-bzw. der 'Verdampfungs'-Kurve sind derzeit noch nicht erklärbar.

5.1.2 HÖHE DES SPRINKLERS ÜBER DEM BRANDHERD : 3 m
VOLUMENSTROM : 90 l/min

Die Bilder 5.1 bis 5.4 zeigen die Tropfenbilanz für die Höhe 3 m und einen Volumenstrom von 90 l/min für die verschiedenen Tropfendurchmesser in Masseprozenten der eingesprützten Wassermenge als Funktion der Wärmefreisetzung. Hier gelten analog die

Bemerkungen wie bei den Bildern 4.1 bis 4.4. Auf den Vergleich zwischen den Tropfengrößen sowie den anderen Parametern wird in Abschnitt 5.2 noch näher eingegangen.

5.1.3 HÖHE DES SPRINKLERS ÜBER DEM BRANDHERD : 4 m
VOLUMENSTROM : 60 l/min

Die Bilder 6.1 bis 6.4 zeigen die Tropfenbilanz für die Höhe 4 m und einen Volumenstrom von 60 l/min für die verschiedenen Tropfendurchmesser in Masseprozenten der eingesprühten Wassermenge als Funktion der Wärmefreisetzung. Die Ausführungen in Abschnitt 5.1.1 sind auch hier zutreffend. Auf die Unterschiede, die aus den veränderten Randbedingungen resultieren, wird in Abschnitt 5.2 noch näher eingegangen.

5.1.4 HÖHE DES SPRINKLERS ÜBER DEM BRANDHERD : 4 m
VOLUMENSTROM : 90 l/min

Die Bilder 7.1 bis 7.4 zeigen die Tropfenbilanz für die Höhe 4 m und einen Volumenstrom von 90 l/min für die verschiedenen Tropfendurchmesser in Masseprozenten der eingesprühten Wassermenge als Funktion der Wärmefreisetzung. Auf die Unterschiede, die aus den veränderten Randbedingungen resultieren, wird in Abschnitt 5.2 noch näher eingegangen.

5.2 VERGLEICH DER BERECHNUNGEN

Beim Vergleich der jeweiligen Tropfengrößen bei verschiedenen Volumenströmen, Sprinklerhöhen und Wärmefreisetzungen läßt sich für die verschiedenen Tropfenbilanzanteile folgendes feststellen:

5.2.1 MASSENANTEIL DER TROPFEN, DER DEN SPRINKLER ERREICHT

0,2 mm-Tropfen (Bild 8.1): Mit zunehmender Wärmefreisetzung nimmt zwar, bedingt durch die größere Auftriebsströmung der Brandgase die Kraft, die die Tropfen zur Umkehr der Bewegungsrichtung zwingt, zu, jedoch überwiegt hier die schnellere vollständige Verdampfung. Damit nimmt der Massenanteil, der zum Sprinkler umkehrt, ab (s.a. Bild 4.1, 5.1, 6.1 und 7.1). Die Variation der Höhe zeigt, daß bei 4 m ein größerer Teil zum Sprinkler umkehrt als bei 3 m Höhe. Der Grund hierfür liegt darin, daß zwar die Auftriebsströmung in einer größeren Entfernung vom Brandherd schwächer ist und daher eigentlich weniger Tropfen den Sprinkler erreichen sollten, jedoch ist, wie noch gezeigt wird, die Verdampfung aufgrund der geringeren Temperaturen nicht so intensiv, wie bei niedrigen Höhen. Der dadurch nicht verdampfte Massenanteil kehrt zum Sprinkler zurück. Bei größerem Volumenstrom nimmt der Anteil ebenfalls, aufgrund der größeren Einsprühgeschwindigkeit und dem damit verbundenen größeren Impuls, ab. Es ergibt sich folgende Reihenfolge: (4 m, 60 l/min) > (4 m, 90 l/min) > (3 m, 60 l/min) > (3m, 90 l/min)

0,5 mm-Tropfen (Bild 8.2): Mit zunehmender Wärmefreisetzung ergibt sich zunächst ein Ansteigen der Kurve mit einem Maximum im Bereich zwischen 300 kW und 500 kW und anschließend einen Abfall. Bei dieser Tropfengröße kann nicht eindeutig beim gesamten Kurvenverlauf festgestellt werden, daß durch einen größeren Wasservolumenstrom ein geringerer Massenanteil den Sprinkler wieder erreicht. Dies liegt daran, daß, wie noch gezeigt wird, bei einem Teil dieser Tropfen mit größerer Ein-

sprühgeschwindigkeit der Impuls genügend groß ist, um den F/R-Bereich stattdessen zu verlassen. Hierdurch kommt es zunächst zu einem Anstieg der Kurven im Bereich niedriger Wärmefreisetzungsraten. Der Anteil, der aus dem F/R-Bereich fliegt nimmt, wie die Bilder 4.2, 5.2, 6.2 und 7.2 eindeutig zeigen, in diesem Bereich ab. Allerdings kann gesagt werden, daß die Maximalwerte der Kurven eindeutig zeigen, daß der Massenanteil mit größerem Volumenstrom und dem damit verbundenen größeren Impuls abnimmt. Der Abfall der Kurven bei der weiteren Steigerung der Wärmefreisetzung resultiert wie bei den 0,2 mm-Tropfen aus der vollständigen Verdampfung (s.a. Bild 4.2, 5.2, 6.2 und 7.2). Dieser Abfall erfolgt jedoch beim 0,5 mm-Tropfen nicht so rasch wie beim 0,2 mm-Tropfen, da aufgrund des schlechteren Wärmeüberganges bei den 0,5 mm-Tropfen die vollständige Verdampfung etwas länger dauert (s.a. Bild 8.1). Die Variation der Höhe zeigt, daß der Massenanteil wie bei den 0,2 mm-Tropfen aufgrund der weniger intensiven Verdampfung bei 4 m größer als bei 3 m Höhe ist.

1,0 mm-Tropfen (Bild 8.3): Auch hier zeigt sich, daß mit größerem Volumenstrom und damit größerem Impuls der Massenanteil, der zum Sprinkler umkehrt, abnimmt. Weiterhin kann man ebenfalls erkennen, daß wie bei den 0,2 mm- und 0,5 mm-Tropfen, der Massenanteil bei 4 m aufgrund der geringeren Verdampfung größer als bei 3 m ist. Allerdings zeigt sich, daß es nur bei größeren Wärmefreisetzungsraten und bei sehr kleinen Einsprühwinkeln im Bereich zwischen 0 und wenigen Grad zu einer vollständigen Verdampfung in dem unter Abschnitt 3 betrachteten Zeitabschnitt bei dieser Tropfengröße kommen kann. Hierdurch ergibt sich bei größeren Wärmefreisetzungsraten, im Gegensatz zu den 0,2 mm- und 0,5 mm-Tropfen, besonders bei 4 m und 60 l/min ein Anstieg der Kurven, d.h. hier kommt wieder die stärkere Auftriebsströmung zum Tragen, die die Tropfen zur Umkehr veranlaßt. Die Werte der übrigen Kurven verlaufen ab 800 kW nahezu konstant, evtl mit einem leichten Abfall.

2,0 mm- (Bild 8.4), 4,0 mm-Tropfen (Bild 8.5): Bei diesen Tropfen kommt es, aufgrund des großen Impulses zu keiner Umkehr

der Bewegungsrichtung.

Die Bilder 9.1 bis 9.4 zeigen den Vergleich der verschiedenen Tropfengrößen bei jeweils konstanten Randbedingungen. Für den Kurvenverlauf der jeweiligen Tropfengröße sind die Aussagen der Kurvendiskussionen zu den Bildern 8.1 bis 8.5 übertragbar. Es wird nachfolgend nur noch auf weitere Besonderheiten beim Kurvenverlauf eingegangen.

3 m, 60 l/min (Bild 9.1): Bei niedrigen Wärmeströmen bis 500 kW, ist der Massenanteil, der den Sprinkler wieder erreicht bei den 0,5 mm-Tropfen am größten. Wie bereits erwähnt wurde, spielt für den Kurvenverlauf die langsamere vollständige Verdampfung gegenüber den 0,2 mm-Tropfen sowie das Verlassen des F/R-Bereiches die entscheidende Rolle.

3 m, 90 l/min (Bild 9.2): Bei diesen Randbedingungen zeigt die Kurve für den 0,5 mm-Tropfen kein Maximum in der Form, wie bei den anderen Höhe/Volumenstrom-Kombinationen. Dieses ist bisher noch nicht erklärbar.

4 m, 60 l/min (Bild 9.3): Bei 100 kW liegt der Wert der 0,2 mm-Tropfen über dem des 0,5 mm-Tropfens. Im Bereich zwischen 100 kW und 200 kW kommt es zur Überschneidung der beiden Kurven. Dieses resultiert aus der vergleichsweise niedrigen Verdampfung bei 4 m. Hierdurch ist daher auch ein großer Massenanteil der 0,2 mm-Tropfen in der Lage, den Sprinkler wieder zu erreichen. Die 0,5 mm-Tropfen überschreiten stattdessen die F/R-Grenze.

4 m, 90 l/min (Bild 9.4): Hier liegt der Wert der 0,2 mm-Tropfen bei 100 kW aus dem gleichen Grund ebenfalls über dem der 0,5 mm-Tropfen.

5.2.2 MASSENANTEIL DER TROPFEN, DER DIE F/R-GRENZE ÜBERSCHREITET

0,2 mm-Tropfen (Bild 10.1): 0,2 mm-Tropfen sind unter den ge-

nannten Randbedingungen aufgrund ihres niedrigen Impulses nicht in der Lage, die F/R-Grenze zu überschreiten.

0,5 mm-Tropfen (Bild 10.2): 0,5 mm-Tropfen sind unter den genannten Randbedingungen bis ca. 500 kW in der Lage, die F/R-Grenze zu überschreiten. Der Maximalwert erreicht hierbei einen Wert von bis zu 70 %. Die höheren Werte ergeben sich hierbei durch die Erhöhung des Wasservolumenstromes. Neben der Vergrößerung der Geschwindigkeitskomponente in vertikaler Richtung ergibt sich auch eine Vergrößerung in horizontaler Richtung bei Einsprühwinkeln größer 0° und einem hieraus resultierenden vergrößerten Impuls in horizontaler Richtung. Eine geringere Höhe vergrößert diesen Massenanteil ebenfalls. Ausschlaggebend ist hierbei der geringere Radius der F/R-Säule bei 3 m gegenüber 4 m nach Bild 3. Es ergibt sich folgende Reihenfolge: (3 m, 90 l/min) > (4 m, 90 l/min) > (3 m, 60 l/min) > (4 m, 60 l/min)

1,0 mm-Tropfen (Bild 10.3): Diese Tropfen sind im gesamten Bereich der untersuchten Wärmefreisetzung in der Lage, die F/R-Grenze zu überschreiten. Ab ca. 700 kW ergibt sich die gleiche Reihenfolge wie beim 0,5 mm-Tropfen:

(3 m, 90 l/min) > (4 m, 90 l/min) > (3 m, 60 l/min) > (4 m, 60 l/min). Im unteren Bereich bis 700 kW kommt es zu Überschneidungen. Hier liegt die Reihenfolge (4 m, 90 l/min) > (3 m, 90 l/min) > (4 m, 60 l/min) > (3 m, 60 l/min) vor. Bei 4 m liegt eine verminderte Rauchgasgeschwindigkeit aufgrund der niedrigeren Temperaturen vor. Die für die Berechnung der Impulsbilanz verwendete Resultierende der Relativgeschwindigkeit zwischen Rauchgas und Tropfen (Wurzel aus der Summe der Quadrate von vertikaler- und horizontaler Geschwindigkeitskomponente) nach /13/ weist durch diese verminderte Gasgeschwindigkeit einen kleineren Wert auf. Hierdurch wird der Term für die Widerstandskraft in der Impulsbilanz in vertikaler und in horizontaler Richtung kleiner, d.h. mehr Tropfen sind in der Lage, die F/R-Grenze zu überschreiten. Im Bereich ab 700 kW trifft dieses zwar auch zu, jedoch überwiegt hier der Faktor des geringeren Radius der F/R-Säule.

2,0 mm-Tropfen (Bild 10.4) und 4,0 mm-Tropfen (Bild 10.5):

Bei den 2 mm- und 4 mm-Tropfen liegt die Reihenfolge
(4 m, 90 l/min) > (4 m, 60 l/min) > (3 m, 90 l/min) >
(3 m, 60 l/min) vor. Diese weicht von den Reihenfolgen bei den
kleineren Tropfendurchmessern ab. Hier spielt hauptsächlich die
größere Höhe die entscheidende Rolle, d.h die verminderte Rauch-
gasgeschwindigkeit. Die gaußförmigen Geschwindigkeitsprofile
nach Bild 1 (s.a /13/) sind in dieser Region relativ flach, d.h.
es ergeben sich schon relativ niedrige Werte zentral über dem
Brandherd. Das gleiche gilt für die Temperaturprofile. Der
größere Volumenstrom hat bei gleicher Höhe eine Erhöhung des
Massenanteiles zur Folge. Der verdampfte Wasseranteil ist bei
diesen großen Tropfen sehr gering, d.h die Masse bleibt nahezu
konstant. Daher gelangen große Tropfen aufgrund ihres großen
Impulses und bei entsprechenden Einsprühwinkeln größer 0° bei
der größeren Höhe relativ schnell an die F/R-Grenze. Z.B. über-
schreiten 4 mm-Tropfen bei 1500 kW und 4 m Höhe bei 60 l/min
erst bei Winkeln größer 12° die F/R-Grenze, wohingegen bei
90 l/min schon bei Winkeln größer 11° . Bei kleineren Winkeln er-
reichen die Tropfen den Brandherd. Die Unterschiede in den Mas-
senanteilen sind sowohl bei den verschiedenen Randbedingungen
als auch zwischen den beiden Tropfengrößen sehr gering.

Die Bilder 11.1 bis 11.4 zeigen den Vergleich der verschiedenen
Tropfengrößen bei jeweils konstanten Randbedingungen. Für den
Kurvenverlauf der jeweiligen Tropfengröße sind die Aussagen der
Kurvendiskussion zu den Bildern 10.1 bis 10.5 übertragbar. Es
wird nachfolgend nur noch auf weitere Besonderheiten beim
Kurvenverlauf eingegangen.

3 m, 60 l/min (Bild 11.1): Hier ergibt sich die Reihenfolge
2,0 mm > 4,0 mm > 1,0 mm > 0,5 mm. Die gleiche Reihenfolge
ergibt sich bei 3 m, 90 l/min (Bild 11.2), 4 m, 60 l/min (Bild
11.3) und 4 m, 90 l/min (Bild 11.4). Ein Grund für die Anomalie,
daß der 2,0 mm-Tropfen einen größeren Massenanteil beim Über-
schreiten der F/R-Grenze als der 4,0 mm-Tropfen aufweist, ist
auf den größeren Einfluß der Schwerkraft bei letzterem zurück-
zuführen. Hierdurch gelangt der 4mm-Tropfen häufiger zum Brand-

herd, statt aus dem F/R-Bereich. Als Beispiel sei an dieser Stelle aufgeführt, daß bei einer Wärmefreisetzung von 1500 kW bei 4 m und 60 l/min die 2 mm-Tropfen im Bereich zwischen 0° und 10° den Brandherd erreichen, bei 4 mm-Tropfen beträgt der Bereich 0° bis 12°. Bei Einsprühwinkeln, die größer sind, fliegen diese Tropfen aus dem F/R-Bereich.

5.2.3 MASSENANTEIL DER TROPFEN, DER DEN BRANDHERD ERREICHT

0,2 mm-Tropfen (Bild 12.1), 0,5 mm-Tropfen (Bild 12.2):

Diese Tropfen sind unter den vorgenannten Randbedingungen nicht in der Lage, den Brandherd zu erreichen.

1,0 mm-Tropfen (Bild 12.3): Von den 1 mm-Tropfen ist nur ein sehr geringer Massenanteil in der Lage, den Brandherd zu erreichen. Wie die Berechnungen gezeigt haben, sind dazu z.B. nur die Tropfen in der Lage, deren Einsprühwinkel bei 3 m und 90 l/min ungefähr im Bereich zwischen 3° (Brand mit 100 kW) und 7° (Brand mit 400 kW) liegen. Der erneute Anstieg bei 3 m und 90 l/min bei den Wärmefreisetzung 600 kW, 800 kW, 1000 kW und 1400 kW ist bisher nicht erklärbar. Der Einsprühwinkel, bei dem die Tropfen hier den Brandherd erreichen, beträgt bei 600 kW 9°, bei 800 kW 10°, bei 1000 kW 11° und bei 1400 kW 13°. Bei kleineren Winkeln fliegen die Tropfen aufgrund der sehr großen Rauchgasgeschwindigkeit zum Sprinkler zurück oder verdampfen, jedoch mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit, vollständig. Bei größeren Winkeln fliegen 1 mm-Tropfen aus dem F/R-Bereich. Es ist die Tendenz zu erkennen, daß bei einer geringeren Höhe mehr Tropfen den Brandherd erreichen. Die Abnahme des Massenanteiles beim 1 mm-Tropfen mit steigender Wärmefreisetzung ist auf die bereits diskutierten Faktoren, wie Umkehr zum Sprinkler und Verdampfung bei steigender Wärmefreisetzung zurückzuführen. Dieses hat eine größere Bedeutung als der Faktor, daß die Brandherdquerschnittsfläche mit steigender Wärmefreisetzung zunimmt und dadurch ein größerer Anteil der Tropfen mit größeren Einsprühwinkeln auf den Brandherd gelangen könnte.

2,0 mm-Tropfen (Bild 12.4): Bei diesen Tropfen ergibt die geringere Höhe eindeutig einen größeren Massenanteil, der den Brandherd erreicht. Aufgrund der geringen Verdampfungsrates bleibt in Verbindung mit der Einsprühgeschwindigkeit der Impuls der Tropfen der dominierende Faktor, obwohl bei geringen Höhen eine wesentlich größere Rauchgasgeschwindigkeit vorliegt. Bei der Änderung des Volumenstromes, d.h. der Einsprühgeschwindigkeit, ist bei gleicher Höhe kaum ein Unterschied in den Massenanteilen festzustellen. Die Zunahme des Massenanteiles mit steigender Wärmefreisetzung ist darauf zurückzuführen, daß sich die Fläche bei der hier verwendeten Simulation des Brandherdes ebenfalls vergrößert und somit mehr Tropfen auch mit größeren Einsprühwinkeln in diesem Bereich auftreffen.

4,0 mm-Tropfen (Bild 12.5): Auch bei den 4 mm-Tropfen ergibt die geringere Höhe, aus dem gleichen Grund wie bei den 2 mm-Tropfen, eindeutig einen größeren Massenanteil, der den Brandherd erreicht. Hier läßt sich die Reihenfolge (3 m, 60 l/min) > (3 m, 90 l/min) > (4 m, 60 l/min) > (4 m, 90 l/min) feststellen. Die Tatsache, daß bei 60 l/min ein größerer Anteil der Tropfen den Brandherd erreicht als bei 90 l/min, obwohl sich bei letzterem ein größerer Impuls ergibt, ist dadurch zu erklären, daß bei 90 l/min die Tropfen schon bei einem kleineren Einsprühwinkel den F/R-Bereich verlassen (s.a. Bild 10.5). Der Grund hierfür liegt darin, daß der größere Impuls auch eine Vergrößerung der Horizontalkomponente der Kraft auf den Tropfen bewirkt und damit das Verlassen des F/R-Bereiches begünstigt. Z.B. erreichen 4 mm-Tropfen bei 1500 kW und 4 m Höhe bei 60 l/min bei Winkeln im Bereich zwischen 0° und 12° den Brandherd, bei 90 l/min dagegen nur zwischen 0° und 11° den Brandherd. Bei größeren Winkeln wird die F/R-Grenze überschritten. Bei den 2 mm-Tropfen macht sich dieser Effekt nicht so stark bemerkbar, wodurch auch kaum Unterschiede in den Kurven festzustellen sind. Der Grund hierfür liegt darin, daß zum einen schon der kleinere Einsprühtröpfendurchmesser einen kleineren Impuls ergibt und daß zum anderen aufgrund des besseren Wärmeüberganges beim 2 mm-Tropfen dieser seinen Durchmesser durch Verdampfung stärker verringert. Der Grund für den Anstieg der Kurven mit

steigender Wärmefreisetzung wurde bei den 2 mm-Tropfen bereits erläutert.

Die Bilder 13.1 bis 13.5 zeigen die Wasserbeaufschlagung am Brandherd für die jeweilige Tropfengröße bei den jeweiligen Randbedingungen. Diese Bilder sind im Zusammenhang mit den Bildern 12.1 bis 12.5 und den dazugehörigen Ausführungen zu sehen. Die Wasserbeaufschlagung stellt ein direktes Maß für das Wasservolumen pro Zeiteinheit und Fläche dar. Die Bezugsfläche ist hierbei die Querschnittsfläche des Brandherdes bei der jeweiligen Wärmefreisetzung nach Bild 3. An dieser Stelle soll noch einmal darauf hingewiesen werden, daß diese Wasserbeaufschlagungen bei einer jeweils konstanten Wärmefreisetzung errechnet werden. Im realen Brandfall muß die Wasserbeaufschlagung für den zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse bzw. der Wärmefreisetzung berechnet werden. Die in den Arbeiten von Schatz (z. B. /11/) aus den Versuchen ermittelten Wasserbeaufschlagungen beziehen sich auf die gesamte, während der Löschzeit aufgefangene Wassermenge und werden anschließend auf den Wert in einer Minute umgerechnet. Dadurch ergibt sich eine zeitliche Mittelung über den Teil der Abbrandkurve, die während der Löschzeit vorliegt. Weiterhin ist zu bedenken, daß es sich im Gegensatz zu dem in der rechnerischen Simulation verwendeten Brandherd in den Brandversuchen um Lagerstapel verschiedener Konfigurationen handelt, die das Spray unterschiedlich beeinflussen.

0,2 mm-Tropfen (Bild 13.1), 0,5 mm-Tropfen (Bild 13.2):

Diese Tropfen erzeugen keine Wasserbeaufschlagung am Brandherd.

1,0 mm-Tropfen (Bild 13.3): Die Wasserbeaufschlagung am Brandherd nimmt mit steigender Wärmefreisetzung durch Vergrößerung der Brandquerschnittsfläche ab. Die 1 mm-Tropfen erreichen bei 3 m und 90 l/min, also der kleinsten Höhe, dem größten Volumenstrom und in Verbindung mit dem für diese Randbedingungen relativ hohen Massenanteil nach Bild 12.3 die höchste Wasserbeaufschlagung. Eine eindeutige Reihenfolge über der Wärmefreisetzung für die verschiedenen Randbedingungen liegt nicht vor.

2,0 mm-Tropfen (Bild 13.4) und 4,0 mm-Tropfen (Bild 13.5):

Auch bei diesen Tropfen nimmt die Wasserbeaufschlagung mit steigender Wärmefreisetzung infolge der Zunahme der Brandquerschnittsfläche ab. Dieses scheint zunächst im Widerspruch zum Massenanteil nach Bild 12.4 und 12.5 zu stehen. Bei der Berechnung des Massenanteiles vergrößert sich mit der Vergrößerung der Fläche des Brandherdes der Massenanteil. Bei der Berechnung der Wasserbeaufschlagung nach Gleichung (10) wird jedoch auf diese Fläche bezogen. Pro Flächeneinheit ergibt sich damit eine geringere Wassermenge mit steigender Wärmefreisetzung. Bei diesen Tropfen ergibt sich die Reihenfolge (3 m, 90 l/min) > (4 m, 90 l/min) > (3 m, 60 l/min) > (4 m, 60 l/min). Diese Reihenfolge weicht von derjenigen ab, die für den Massenanteil, der den Brandherd beim 4 mm-Tropfen erreicht (Bild 12.5) festgestellt wurde. Der Unterschied liegt daran, daß im Gegensatz zum Massenanteil der Wasservolumenstrom bei der Beaufschlagung direkt eingeht. Dadurch ergeben sich bei 90 l/min die höchsten Werte. Gleichzeitig macht sich aber auch der höhere Massenanteil bei 3 m gegenüber 4 m bemerkbar.

Die Bilder 14.1 bis 14.4 zeigen den Vergleich der verschiedenen Tropfengrößen, die den Brandherd erreichen bei jeweils konstanten Randbedingungen.

3 m, 60 l/min (Bild 14.1), 3 m, 90 l/min (Bild 14.2), 4 m, 60 l/min, (Bild 14.3) und 4 m, 90 l/min (Bild 14.4): Hier ergibt sich die Reihenfolge 4 mm > 2 mm > 1 mm. Kleinere Tropfen erreichen den Brandherd nicht. Die Abnahme des Massenanteiles beim 1 mm-Tropfen mit steigender Wärmefreisetzung ist auf die bereits diskutierten Faktoren, wie Umkehr zum Sprinkler und Verdampfung bei steigender Wärmefreisetzung zurückzuführen.

Die Bilder 15.1 bis 15.4 zeigen die entsprechenden Kurven der Wasserbeaufschlagungen für die verschiedenen Tropfengrößen bei jeweils konstanten Randbedingungen. Die Reihenfolge der Tropfengrößen entspricht der von den Massenanteilen in der Bildern 14.1 bis 14.4.

5.2.4 MASSENANTEIL DER TROPFEN, DER VERDAMPFT

0,2 mm-Tropfen (Bild 16.1): Wie bereits erläutert, verdampfen 0,2 mm-Tropfen schon in relativ kurzer Zeit bei relativ niedriger Wärmefreisetzung vollständig. Die Geschwindigkeit der Verdampfung nimmt mit steigender Wärmefreisetzung zu. Für die verschiedenen Randbedingungen liegt die Reihenfolge (3 m, 90 l/min) > (3 m, 60 l/min) > (4 m, 90 l/min) > (4 m, 60 l/min) vor. Bei der niedrigen Höhe ergibt sich aufgrund des hohen Temperaturniveaus im F/R-Bereich die höchsten Werte. Ein größerer Volumenstrom bedingt ebenfalls eine größere Verdampfung infolge der sich hierdurch ergebenden größeren Relativgeschwindigkeit. Eine Vergrößerung der Relativgeschwindigkeit führt zu einer Vergrößerung der Reynolds-Zahl. Dieses wiederum bewirkt eine Erhöhung der den Wärmeübergang beschreibenden Nusselt-Zahl und der den Stoffübergang beschreibenden Sherwood-Zahl für den Tropfen. Die Theorie hierzu wird in /13/ ausführlich behandelt. Dieser verdampfte Massenanteil ergibt zusammen mit dem Anteil, der zum Sprinkler umkehrt (Bild 8.1) 100 % der Masse der 0,2 mm-Tropfen.

0,5 mm-Tropfen (Bild 16.2): 0,5 mm-Tropfen verdampfen, zwar etwas langsamer und bei etwas größeren Wärmefreisetzungsraten als 0,2 mm-Tropfen, aber ebenfalls vollständig. Eine eindeutige Reihenfolge bei geänderten Versuchsparametern kann jedoch hier nicht angegeben werden. Dies liegt daran, daß ein Teil dieser Tropfen in der Lage ist, die F/R-Grenze zu überschreiten (s.a. Bild 10.2) und ein Teil zum Sprinkler umkehrt (s.a. Bild 8.2).

1,0 mm-Tropfen (Bild 16.3): Bei den Berechnungen hat sich gezeigt, daß es nur bei größeren Wärmefreisetzungen und bei sehr kleinen Einsprühwinkeln im Bereich zwischen 0 und wenigen Grad zu einer vollständigen Verdampfung in dem unter Abschnitt 3 betrachteten Zeitabschnitt bei dieser Tropfengröße kommen kann. Im Bereich bis ca. 900 kW ergibt sich die Reihenfolge (3 m, 60 l/min) > (3 m, 90 l/min) > (4 m, 60 l/min) > (4 m, 90 l/min). Bei der kleineren Höhe ergibt sich aufgrund des höheren Temperaturniveaus eine größere Verdampfungsrates für die

Tropfen. Die Vergrößerung der Relativgeschwindigkeit durch einen höheren Volumenstrom hat hier eine nicht so entscheidende Bedeutung für die Verdampfungsgeschwindigkeit wie bei den 0,2 mm - Tropfen. Dies liegt daran, daß in diesem Bereich sehr viele Tropfen nach Bild 10.3 den F/R-Bereich verlassen und der Verdampfungsvorgang hier nicht mehr betrachtet wird. Bei größeren Wärmefreisetzungen ergibt sich die Reihenfolge (3 m, 60 l/min) > (4 m, 60 l/min) > (3 m, 90 l/min) > (4 m, 90 l/min). Die Kurve für 4 m und 60 l/min steigt hierbei so stark an, daß die Werte von 3 m und 90 l/min eindeutig überschritten werden. Dies liegt daran, daß bei 4 m und 60 l/min die wenigsten Tropfen nach Bild 10.3 in der Lage sind, die F/R-Grenze zu überschreiten und stattdessen nach Bild 8.3 zum Sprinkler umkehren. Diese unterliegen daher weiter der Verdampfung.

Die Bilder 16.4 und 16.5 zeigen den Massenanteil der verdampften Tropfenmasse für 2 mm- und 4 mm-Tropfen. Die Verdampfung während der Bewegungsphase im F/R-Bereich ist bei diesen Tropfen sehr gering. Der Verdampfungsvorgang nach Erreichen des Brandherdes wird nicht betrachtet.

Die Bilder 17.1 bis 17.4 zeigen den Vergleich der verdampften Tropfenmasse für verschiedenen Tropfengrößen bei jeweils konstanten Randbedingungen. Es ist hierbei jeweils die Reihenfolge 0,2 mm > 0,5 mm > 1,0 mm > 2,0 mm > 4,0 mm zu erkennen. Ein entscheidender Grund für diese Reihenfolge ist, daß mit zunehmendem Tropfendurchmesser sowohl der Wärme- als auch der Stoffübertragungskoeffizient kleiner wird. Nähere Einzelheiten hierzu werden in /13/ aufgeführt.

5.3 WÄRMEABSORPTION DURCH DEN TROPFENSCHWARM WÄHREND DER BEWEGUNG DURCH DEN F/R-BEREICH

Die nachfolgend beschriebenen Bilder 18.1 bis 19.4 zeigen das Verhältnis der durch den Tropfenschwarm absorbierten Wärme zu der durch den Brand freigesetzten Wärme. Hierbei werden nur die Tropfengrößen dargestellt, die in der Lage sind, den Brandherd

zu erreichen. Die berechneten Werte haben zunächst nur qualitativen Charakter, da einige Vereinfachungen getroffen worden sind, auf die in Abschnitt 4 bereits eingegangen worden ist und deren Berücksichtigung für die Berechnung der Wärmeabsorption aber von entscheidender Bedeutung und daher nicht vernachlässigbar sind. U.a haben der Feuchtegehalt des Rauchgases sowie die Kühlung des Brandherdes und des Rauchgases durch die Verdampfung des Tropfenschwarmes einen entscheidenden Einfluß auf das weitere Verhalten des Tropfenschwarmes bezüglich des Wärme-, Stoff- und Impulstransportes. In /14/ werden Literaturstellen angeführt, die sich mit der Wärmeabsorption durch Sprühnebel befassen.

Bild 18.1 zeigt den 1 mm-Tropfen bei den verschiedenen Randbedingungen. Im Gegensatz zum Massenanteil der verdampften Tropfenmasse nach Bild 16.3 tritt hierbei wieder, wie bei der Wasserbeaufschlagung die wirkliche Wassermenge in Erscheinung, sodaß die Werte bei 90 l/min größer als bei 60 l/min sind. Gleichzeitig wird jedoch die unterschiedliche Neigung zur Verdampfung bei den verschiedenen Randbedingungen, die bei der Diskussion von Bild 16.3 bereits erläutert wurde, überlagert. Die extremen Schwankungen in den jeweiligen Kurvenverläufen sind hierbei zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht erklärbar. Die Tendenz des Abfalles der Kurven mit steigender Wärmefreisetzung ist auf die jeweils gleichbleibende Tropfenanzahl zurückzuführen, d.h. eine größere Wärmemenge muß von der gleichen Anzahl von Tropfen absorbiert werden. Im Bereich niedriger Wärmefreisetzungsraten treten Verhältniswerte auf, die etwas größer als 1 sind. Bei den hier nicht dargestellten kleineren Tropfen sind diese Werte noch erheblich größer. Dieses ist unrealistisch und hängt u.a. mit der nicht berücksichtigten zeitlich veränderlichen Luftfeuchtigkeit zusammen. Bei kleinen Tropfen kommt hinzu, daß erstens deren Anzahl beim Monoschwarm sehr groß ist und diese zweitens vollständig verdampfen und daher der errechnete Wert für die absorbierte Wärme unrealistisch hoch ausfällt.

Die Bilder 18.2 und 18.3 zeigen die entsprechenden Diagramme für

2 mm- und 4 mm-Tropfen.

Die Bilder 19.1 bis 19.3 zeigen den Vergleich dieses Wärmeverhältnisses für die verschiedenen Tropfengrößen bei jeweils konstanten Randbedingungen. Hier ist wieder die zu erwartende Reihenfolge $1,0 \text{ mm} > 2,0 \text{ mm} > 4,0 \text{ mm}$ zu erkennen.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das wichtigste Anforderungskriterium an das Sprühverhalten eines Sprinklers ist, die auftriebsbehaftete Rauchgasströmung eines natürlichen Brandes zu durchdringen und die brennende Oberfläche zu löschen. Weiterhin werden die Flamme, die heißen Rauchgase sowie benachbarte Bauteile und die Brandlast gekühlt.

Als Fortsetzung der bisher an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) durchgeführten Arbeiten zur Untersuchung der Wechselwirkungen eines Einzeltropfens mit einer, realen Brandbedingungen entsprechenden Heißgasströmung, unter besonderer Berücksichtigung der Löschwirksamkeit sowie einer Literaturlauswertung, die sich mit dem Verhalten des Tropfenschwarmes befaßt, wird in dieser Arbeit die rechnerische Simulation des Verhaltens eines Tropfenschwarmes behandelt.

Bei der rechnerischen Simulation müssen zum einen wegen der komplexen Problematik, wegen bisher quantitativ nicht erfaßbarer Einflußgrößen und zur Begrenzung der Rechenzeit und der Anforderungen an die Speicherkapazität der EDV-Anlage Vereinfachungen getroffen werden. Für die rechnerische Simulation wurde ein Modell mit entsprechenden Vereinfachungen entwickelt, das die Untersuchung dieser Problematik ermöglicht.

Das Sprinklerspray wird vorläufig durch einen Monoschwarm aus Tropfen gleicher Größe simuliert. Es werden die Tropfengröße, der Sprinklervolumenstrom, die Sprinklerhöhe und die Wärmefreisetzung des Brandes variiert. Aus der gekoppelten Wärme-, Stoff-

und Impulsbilanz zwischen den Tropfen und einer Heißgasströmung wird eine Tropfenbilanz ermittelt, die besagt, welcher Massenanteil bei den vorgegebenen Anfangs- und Randbedingungen den Sprinkler infolge der Auftriebsströmung wieder erreicht, welcher den Flammen-/Rauchgasbereich verläßt und welcher den Brandherd erreicht bzw. verdampft. Weiterhin wird die am Brandherd auftretende Wasserbeaufschlagung sowie die durch den Tropfenschwarm absorbierte Wärme berechnet. Bei den Untersuchungen hat sich gezeigt, daß die verschiedenen Tropfengrößen und Randbedingungen einen ganz erheblichen Einfluß auf die Tropfenbilanz haben. Zu erwähnen sei hier z.B. der größere Impuls bei größeren Tropfen und die stärkere Neigung zur Verdampfung bei kleineren Tropfen. Diese Faktoren haben einen entscheidenden Einfluß auf die Wasserbeaufschlagung und die Kühlwirkung des Tropfenschwarmes.

Die Arbeit kann dazu dienen, bei der Auslegung von Sprinklern das Tropfenspektrum entsprechend der zu erwartenden Wärmefreisetzung durch den Brand und sonstigen Randbedingungen zu bemessen. Für die Zukunft sind Untersuchungen am Polyschwarm sowie die Berücksichtigung der zeitlich veränderlichen Luftfeuchtigkeit durch die Verdampfung des Tropfenschwarmes geplant.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Brein, D.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 1: Literaturlauswertung.
Forschungsbericht Nr. 55 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1985)
- /2/ Brein, D.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 2: Großbrandversuche 1.
Forschungsbericht Nr. 58 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1986)
- /3/ Brein, D.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 3: Großbrandversuche 2.
Forschungsbericht Nr. 64 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1988)

- /4/ Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 4: Großbrandversuche 3.
Forschungsbericht Nr. 65 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1988)
- /5/ Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 5: Großbrandversuche 4.
Forschungsbericht Nr. 68 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1989)
- /6/ Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 6: Großbrandversuche 5.
Forschungsbericht Nr. 72 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1989)
- /7/ Schatz, H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 1: Literaturlauswertung und

Errichtung der Versuchsanlage.
Forschungsbericht Nr. 53 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer-
wehrangelegenheiten.

Karlsruhe: Forschungsstelle für
Brandschutztechnik 1985.

/8/ Schatz, H.:

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 3: Entwicklung und Einsatz von
Sprinklern.

Forschungsbericht Nr. 57 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer-
wehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für
Brandschutztechnik (1986)

/9/ Schatz, H.:

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 4: Löschversuche mit Sprinklern 1.
Forschungsbericht Nr. 62 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer-
wehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für
Brandschutztechnik (1987)

/10/ Schatz, H.:

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 5: Löschversuche mit Sprinklern 2.
Forschungsbericht Nr. 67 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer-
wehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für

Brandschutztechnik (1988)

- /11/ Schatz, H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 6: Löschversuche mit Sprinklern 3.
Forschungsbericht Nr. 70 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer
wehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für
Brandschutztechnik (1989)
- /12/ Schatz, H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 7: Literaturlauswertung und
Simulation der Wasserbeaufschlagung.
Forschungsbericht Nr. 74 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer
wehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für
Brandschutztechnik (1990)
- /13/ Schatz, H. Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Kunkelmann, J.: Teil 2: Literaturübersicht und Be-
rechnungsgrundlagen für die Wärme-
übertragung bei Tropfen in einer
Heißgasströmung.
Forschungsbericht Nr. 54 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer-
wehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für
Brandschutztechnik (1985)
- /14/ Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen
Stoffen, die in lagermäßiger An-

ordnung gestapelt sind.

Teil 7: Literaturübersicht über die Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit einer Heißgasströmung.

Forschungsbericht Nr. 76 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1990)

8. BILDER

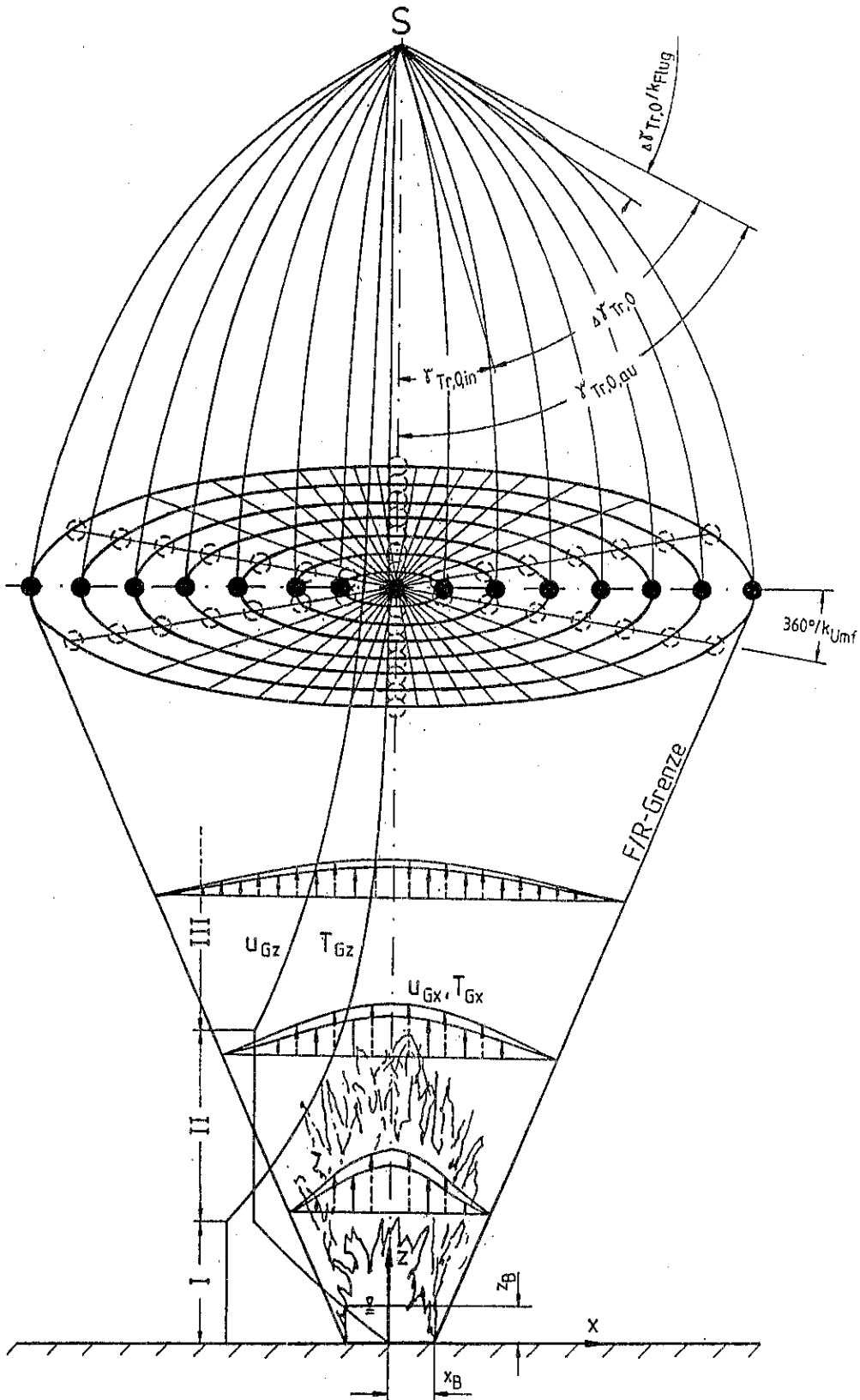


Bild 1 Modell zur Berechnung der Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit einer Heißgasströmung.

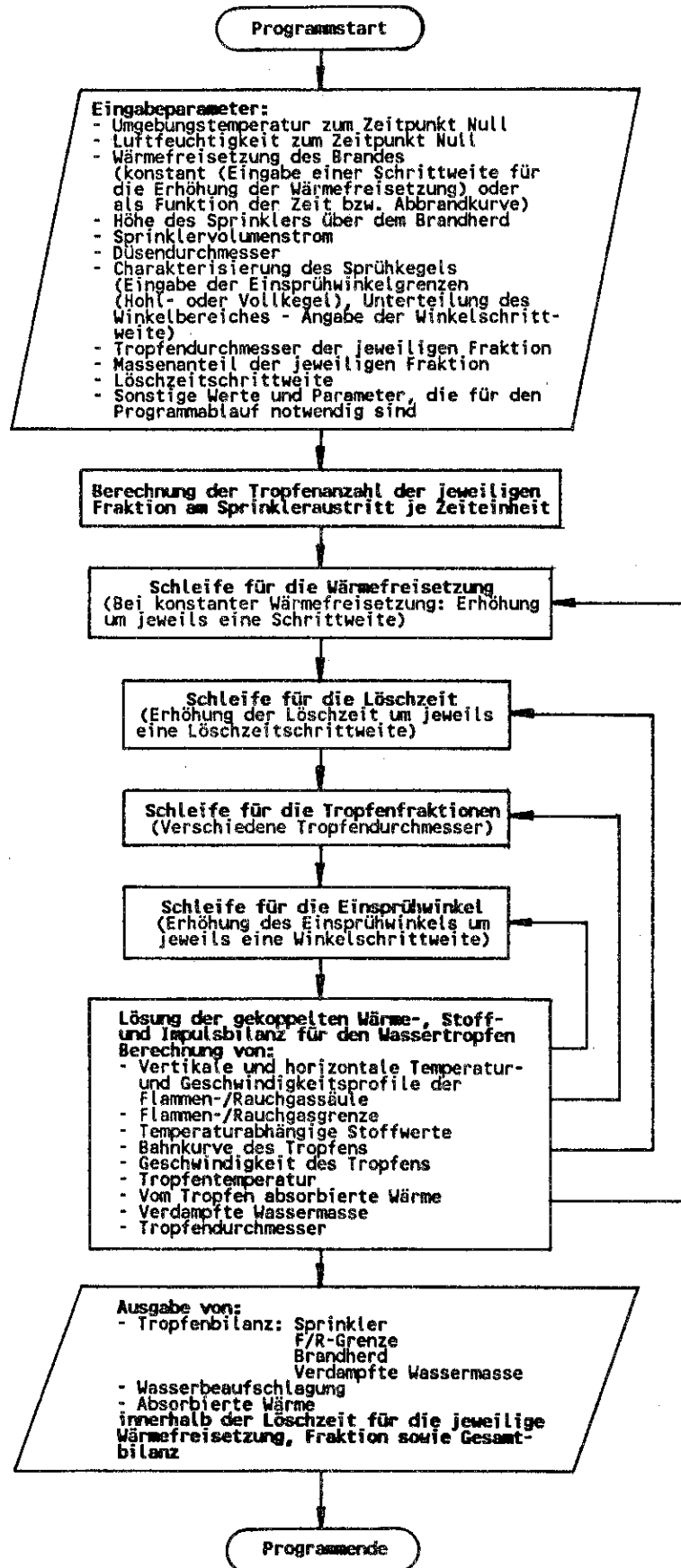


Bild 2 Flußdiagramm zur numerischen Simulation.

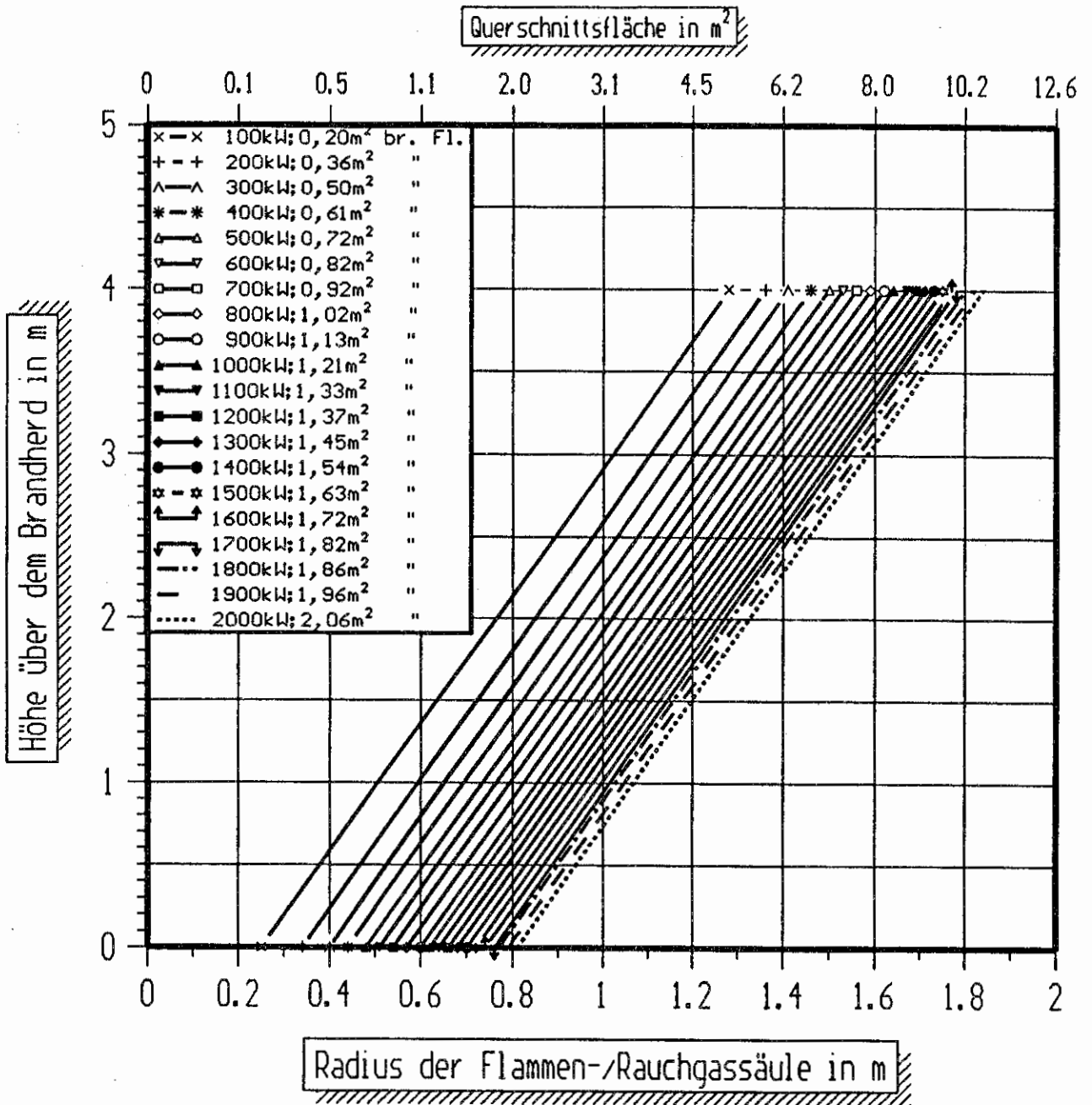


Bild 3 Radius der Flammen-/Rauchgassäule als Funktion der Wärmefreisetzung.

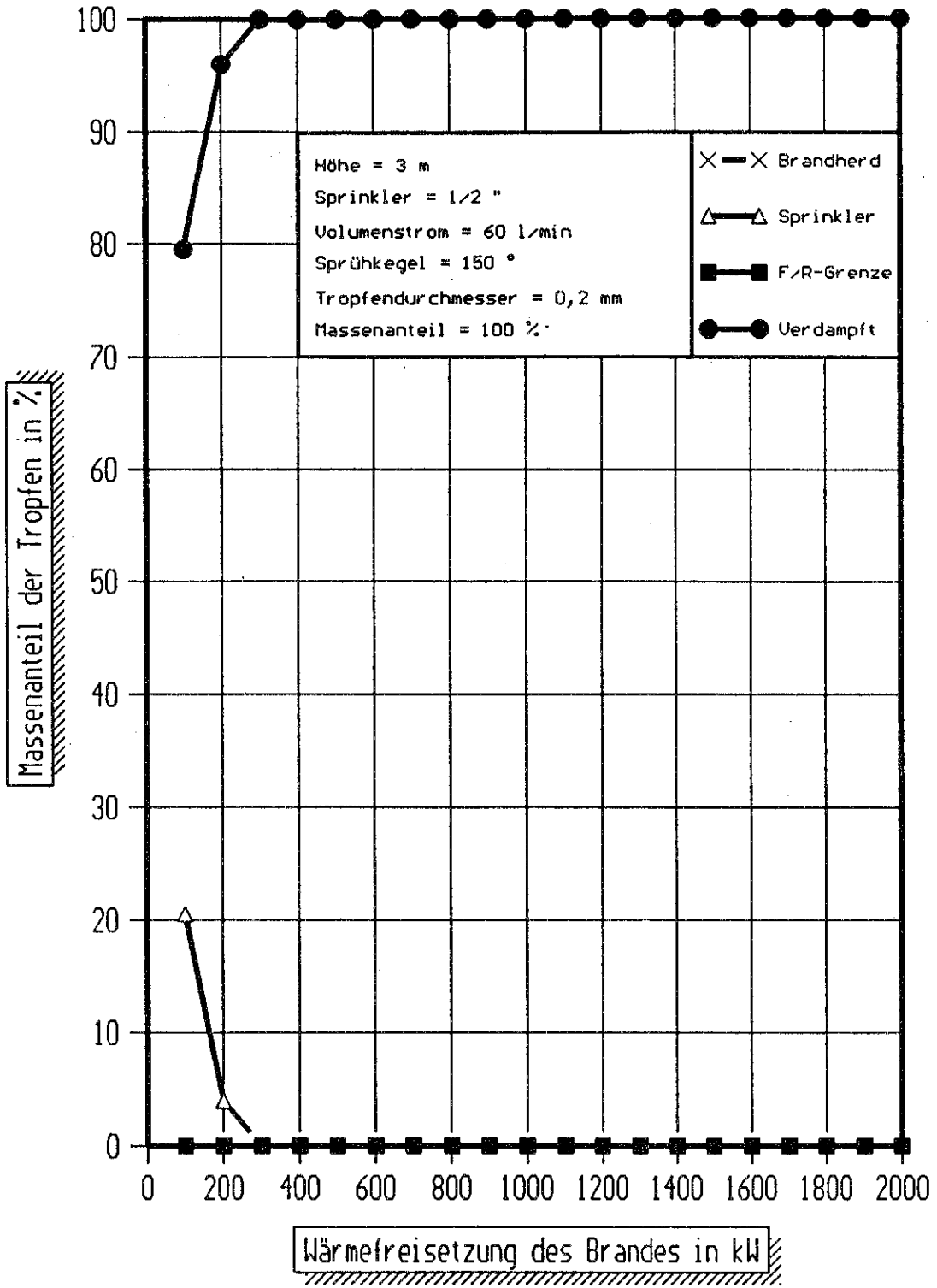


Bild 4.1 Tropfenbilanz von 0,2 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

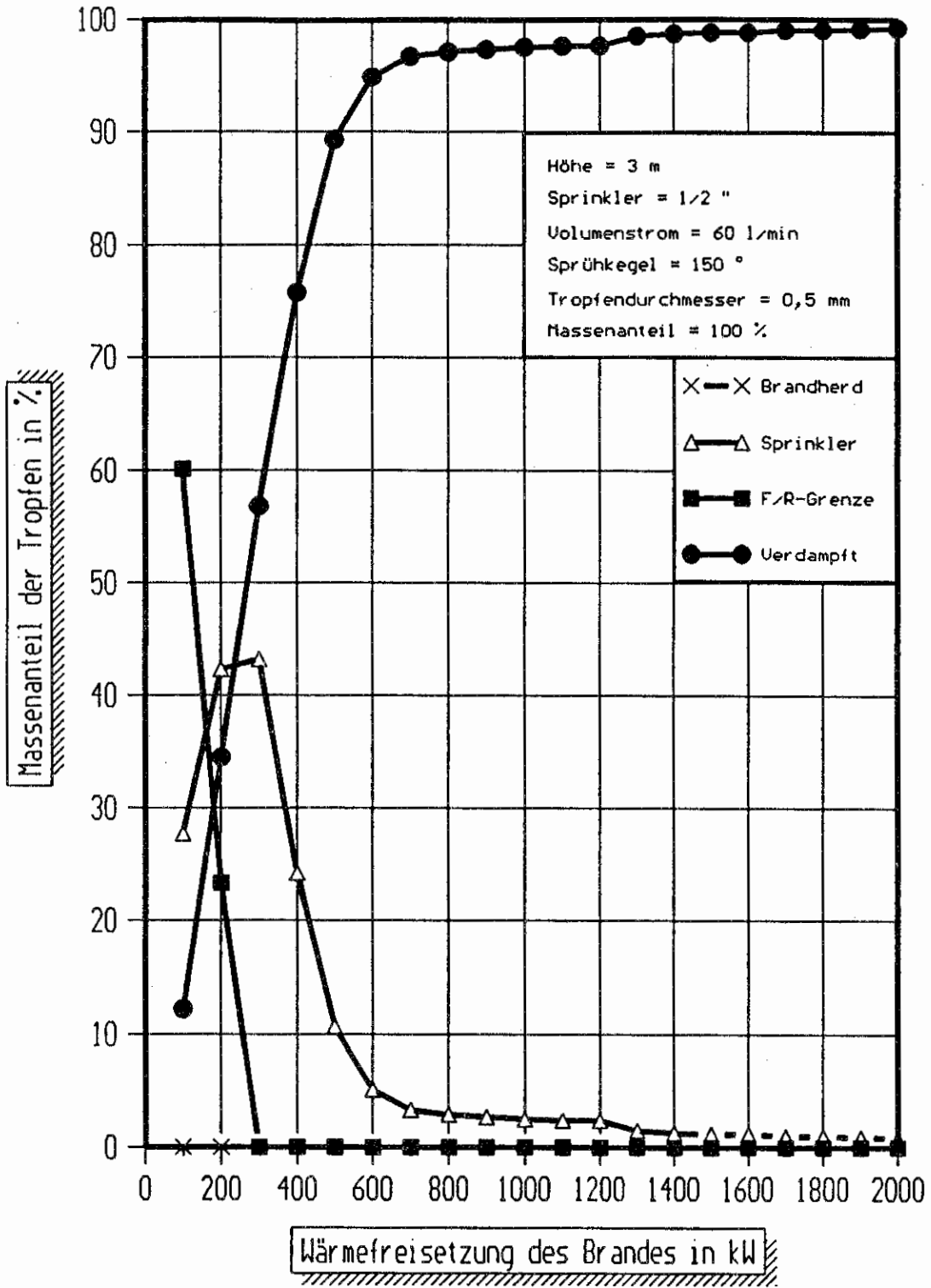


Bild 4.2 Tropfenbilanz von 0,5 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom 60 l/min.

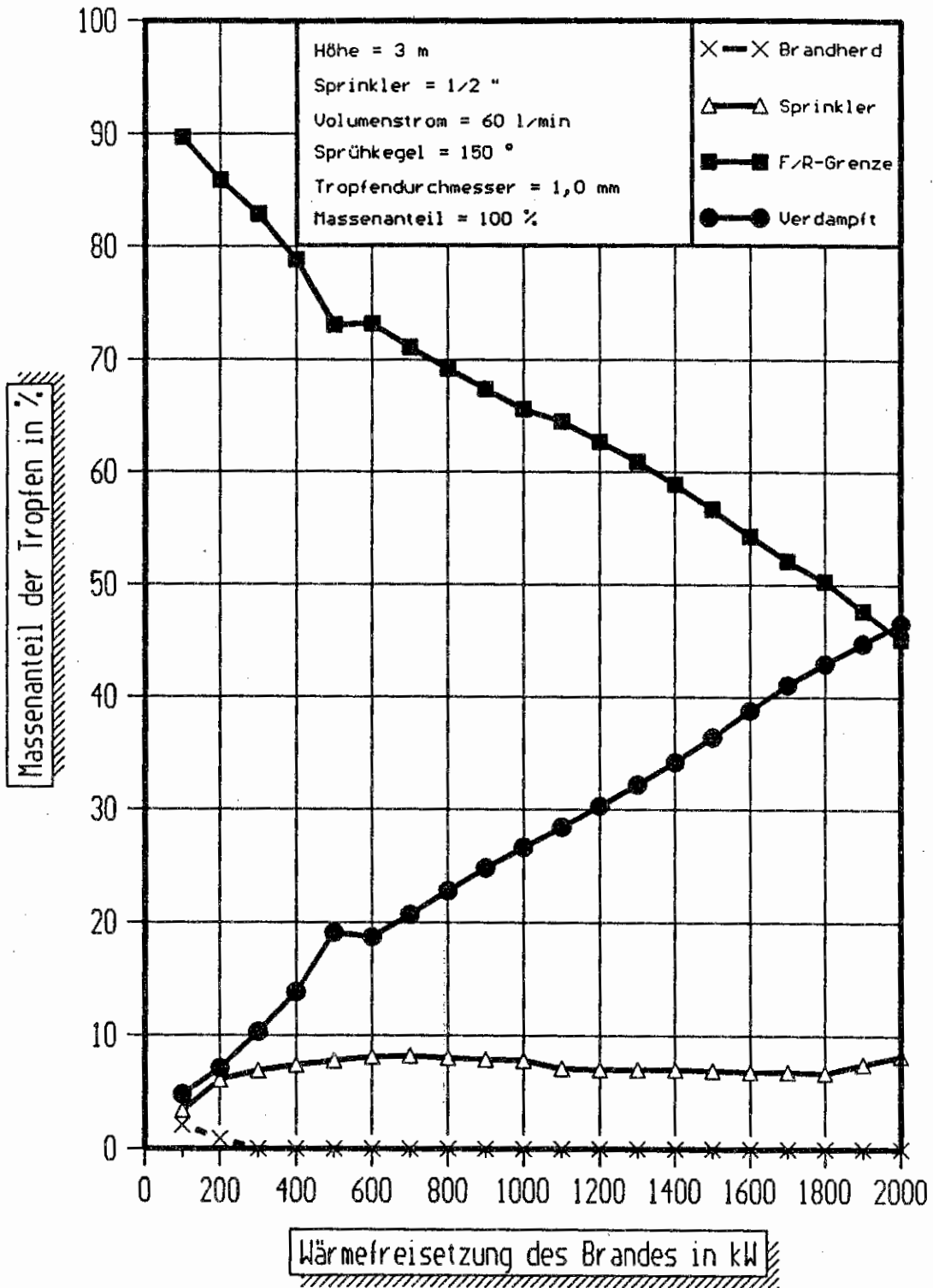


Bild 4.3 Tropfenbilanz von 1,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

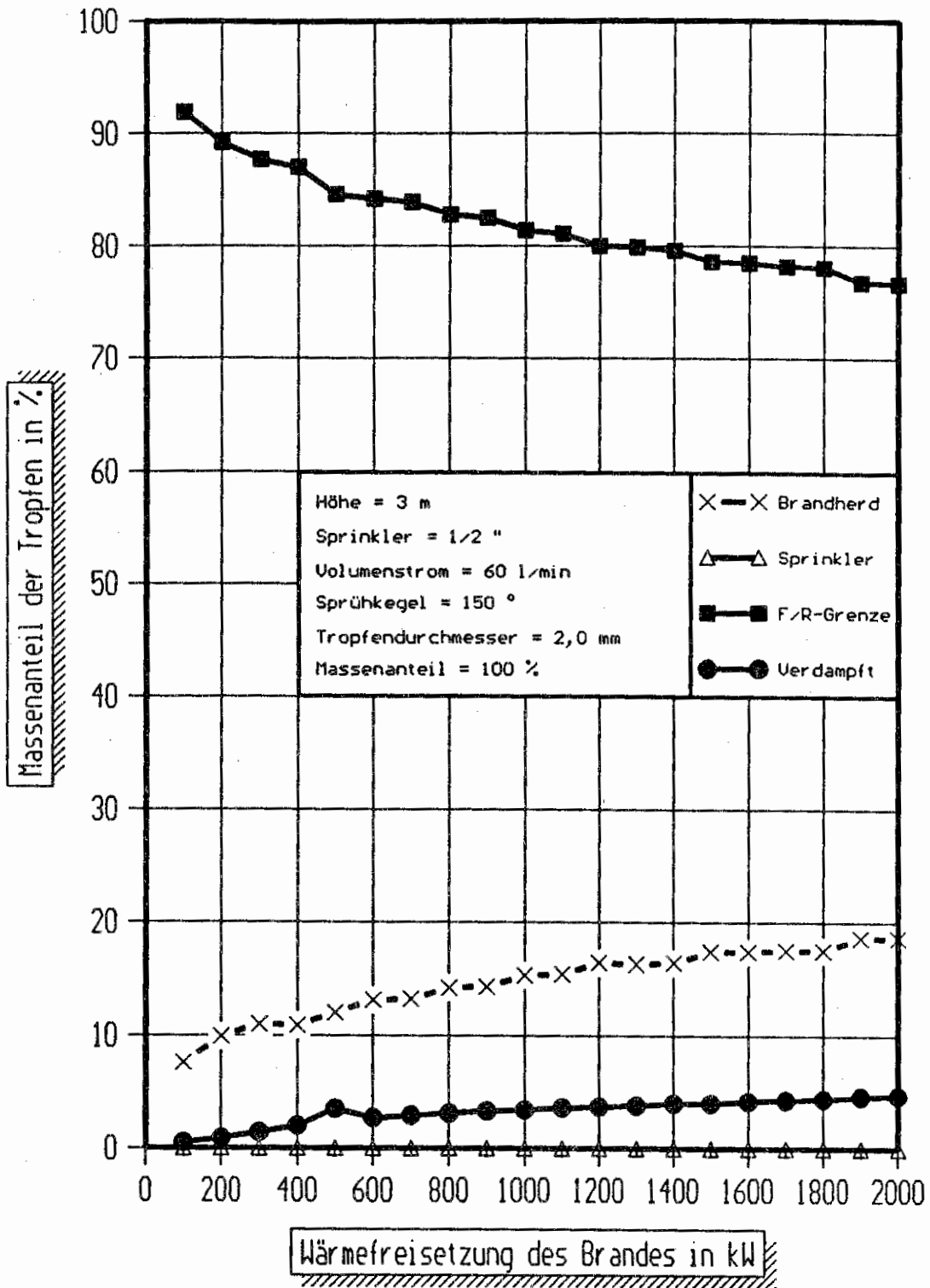


Bild 4.4 Tropfenbilanz von 2,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

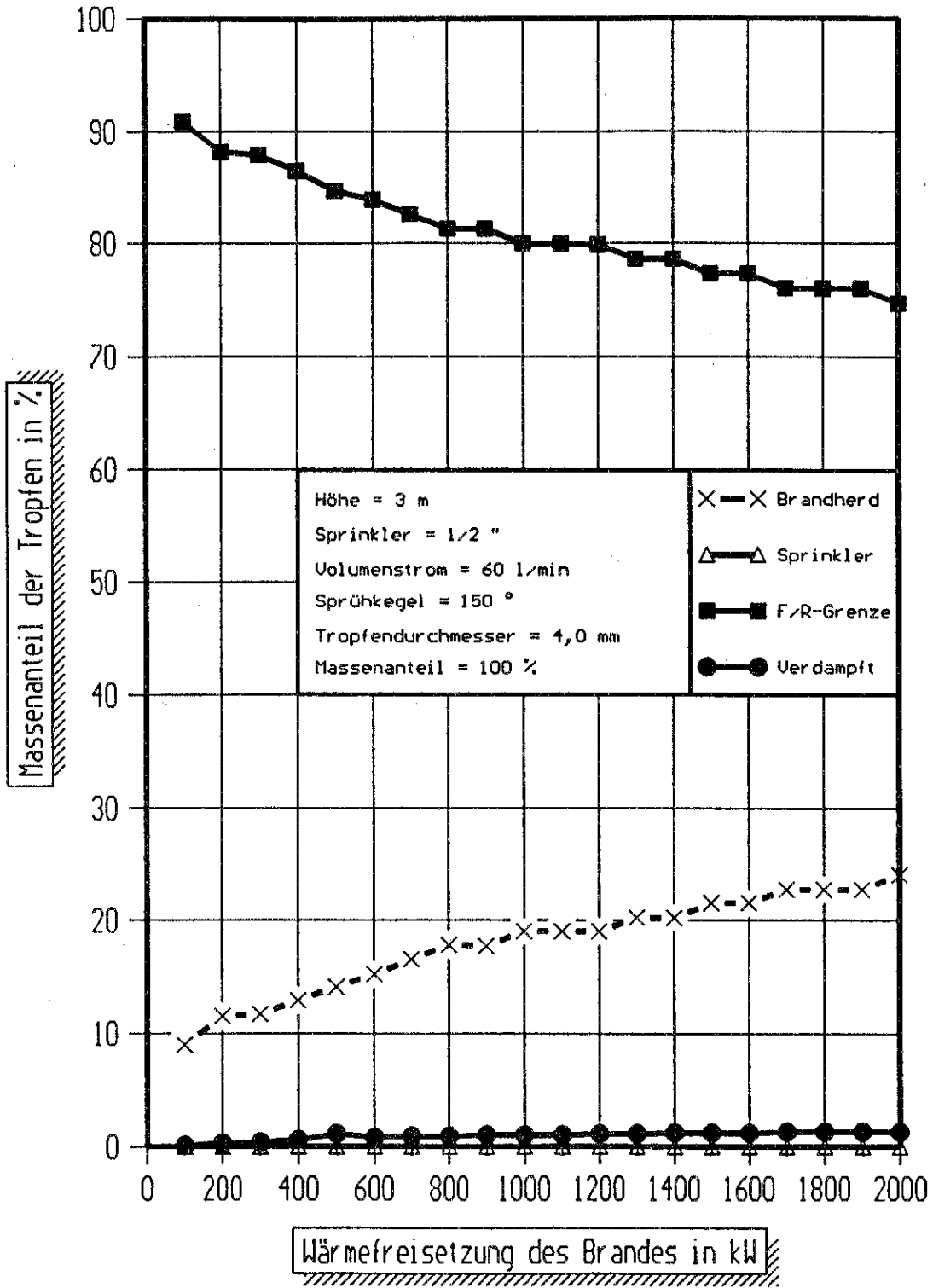


Bild 4.5 Tropfenbilanz von 4,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

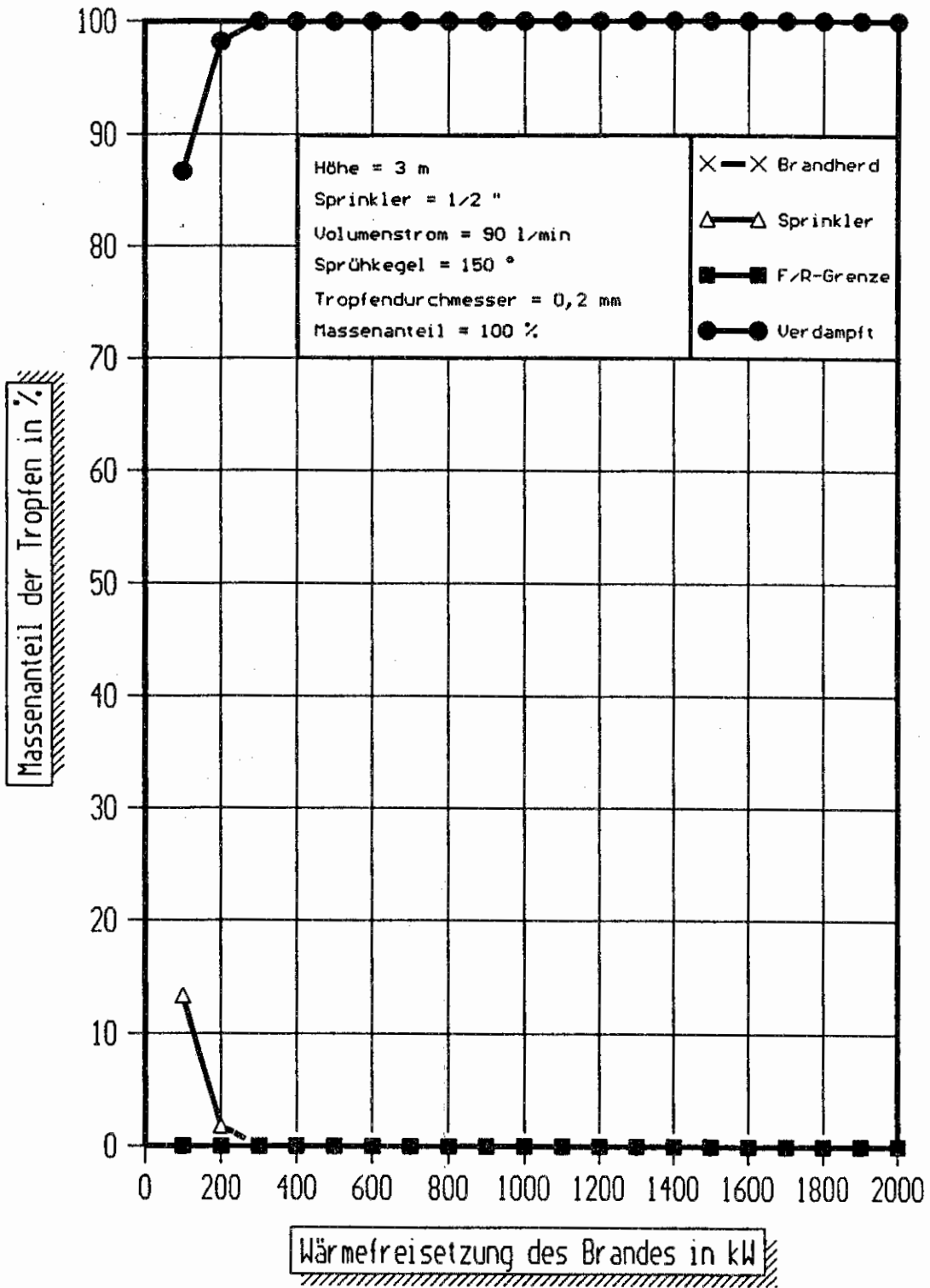


Bild 5.1 Tropfenbilanz von 0,2 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

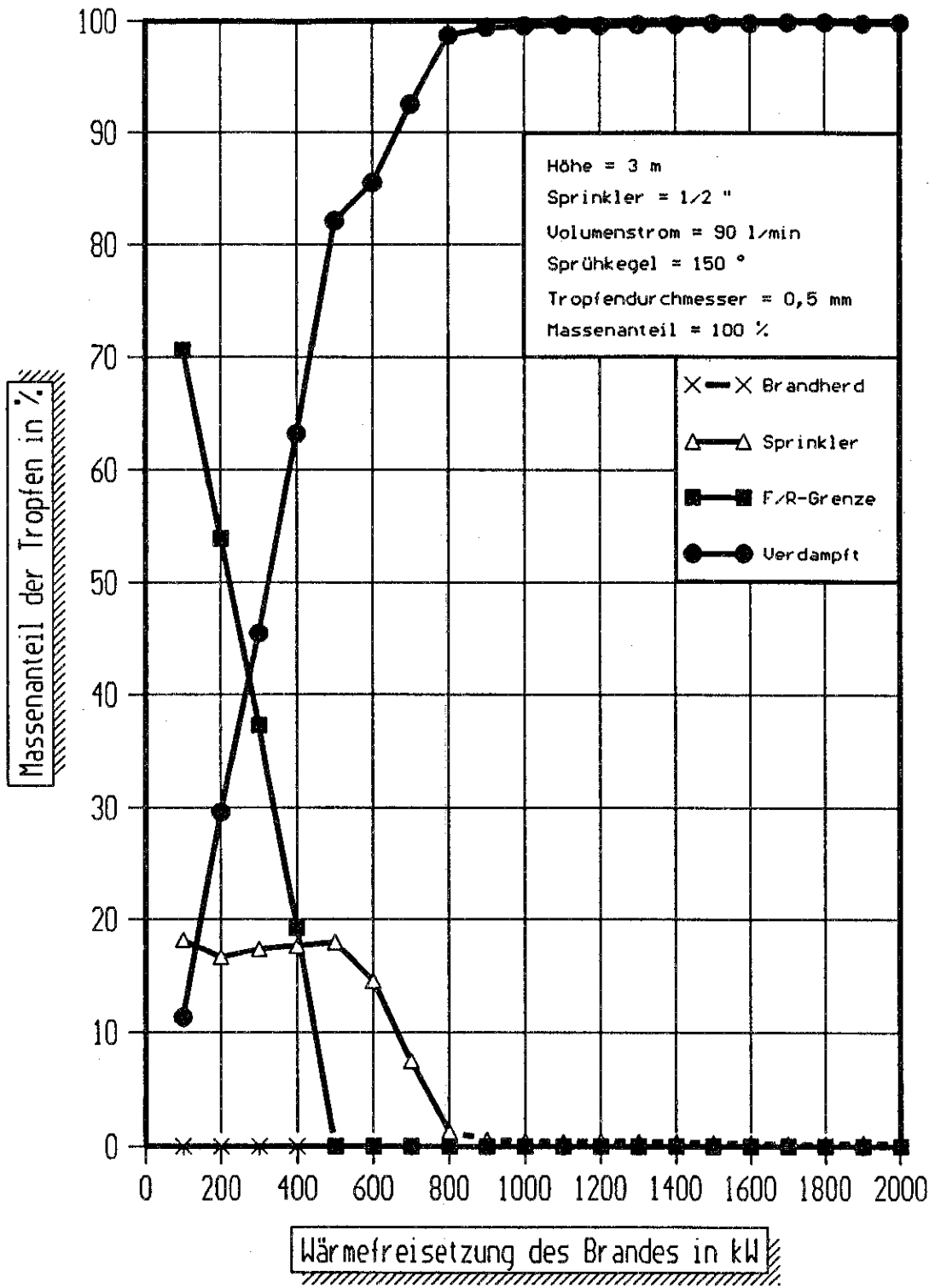


Bild 5.2 Tropfenbilanz von 0,5 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

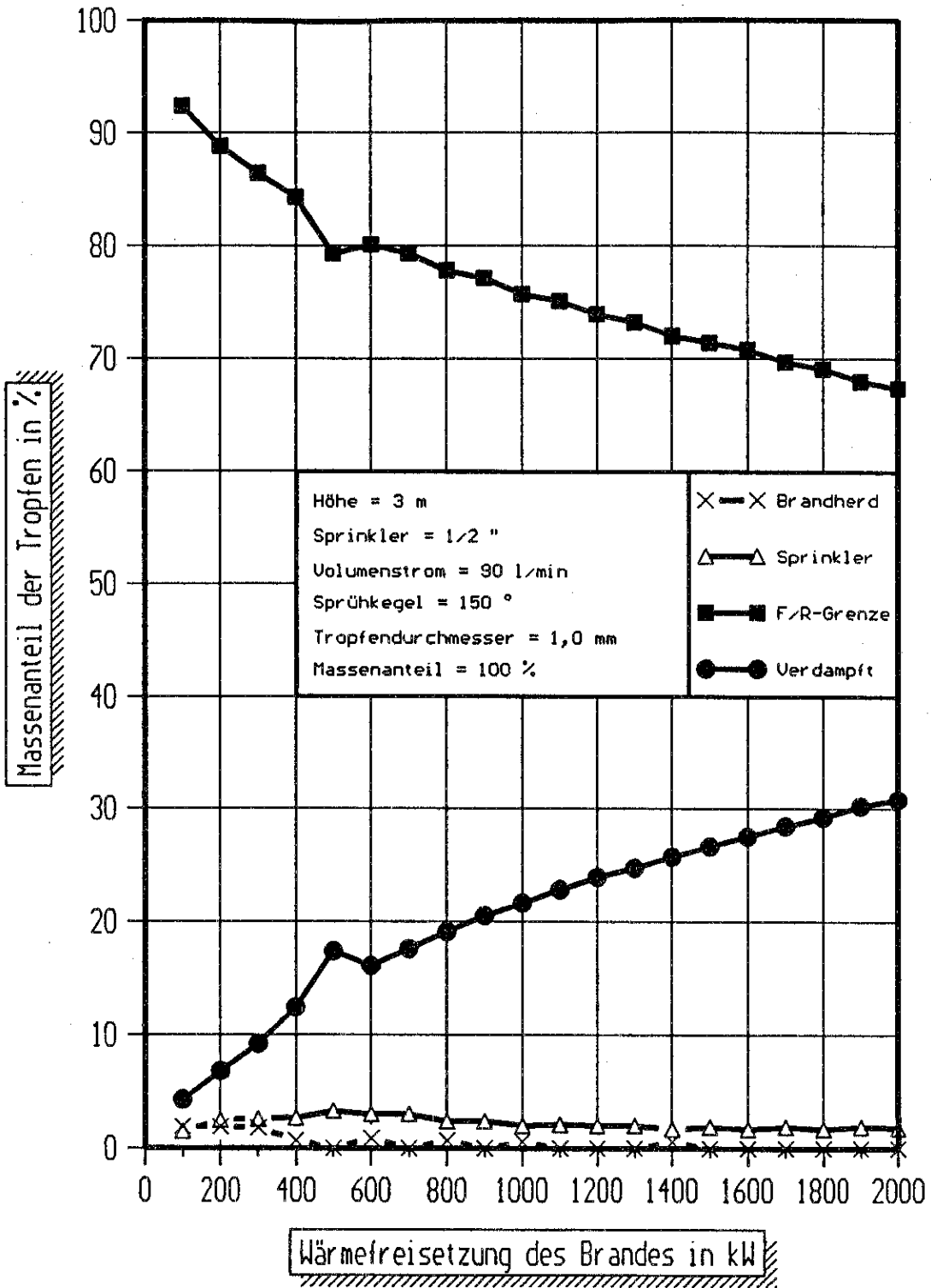


Bild 5.3 Tropfenbilanz von 1,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

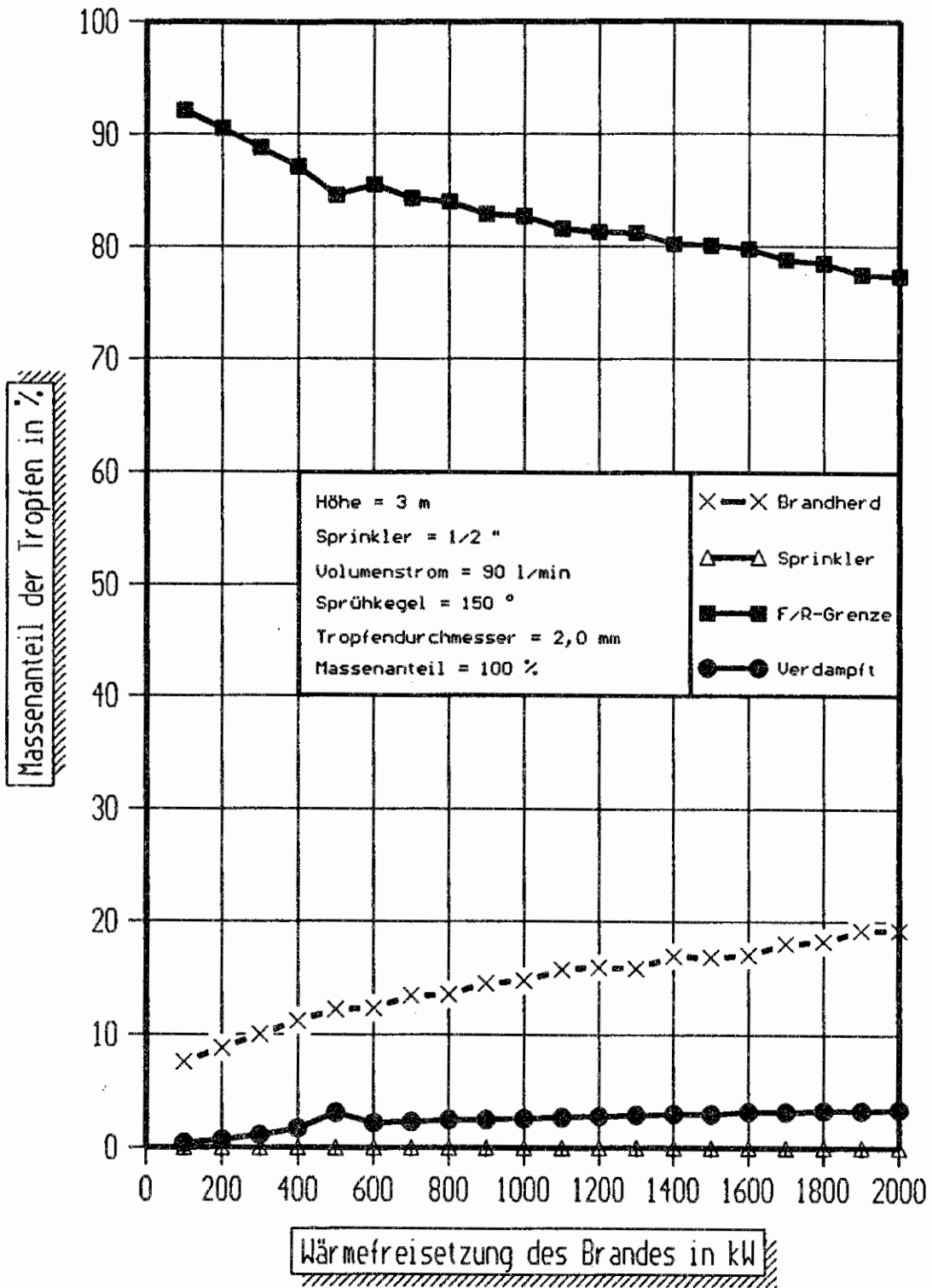


Bild 5.4 Tropfenbilanz von 2,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

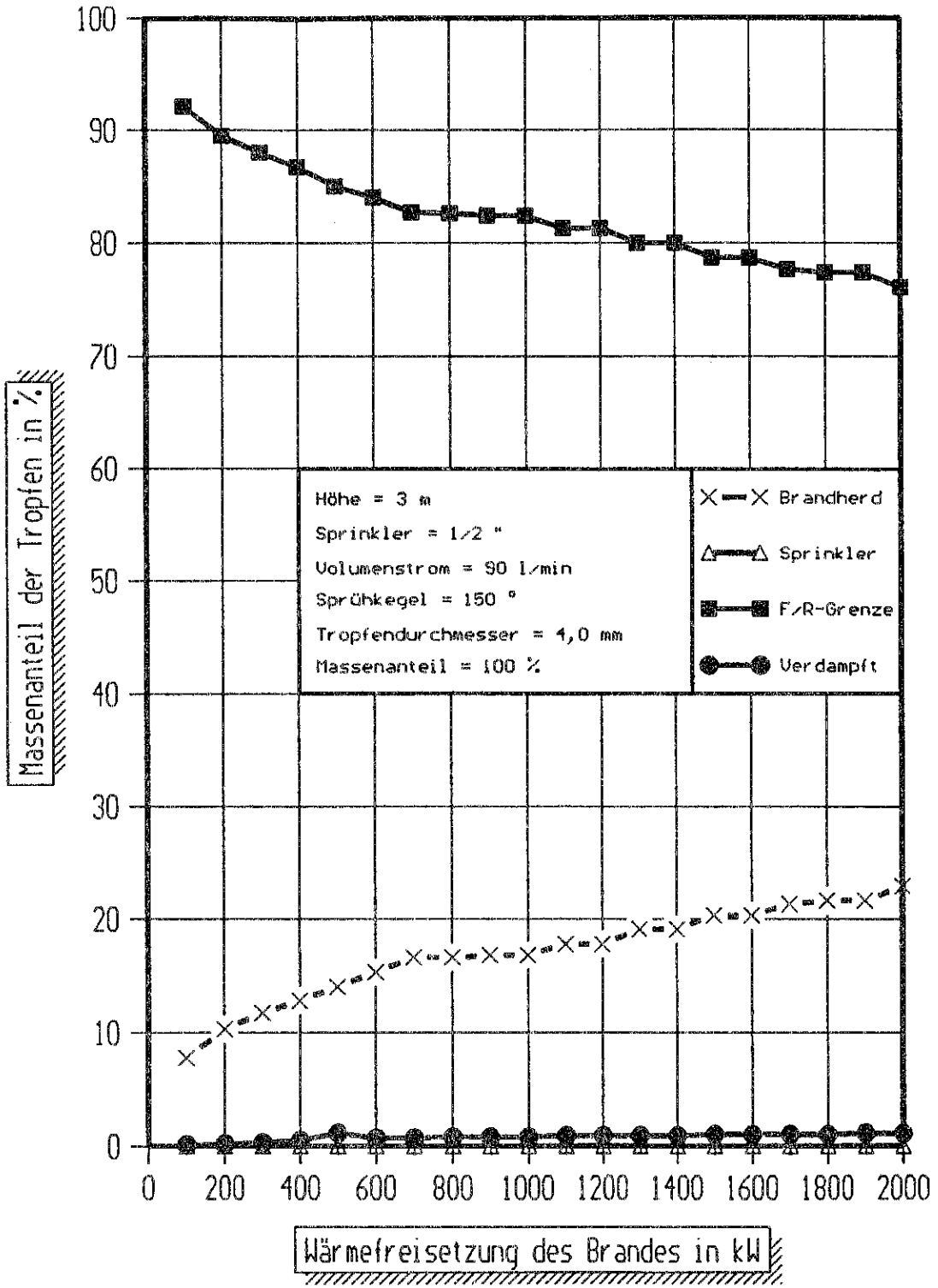


Bild 5.5 Tropfenbilanz von 4,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

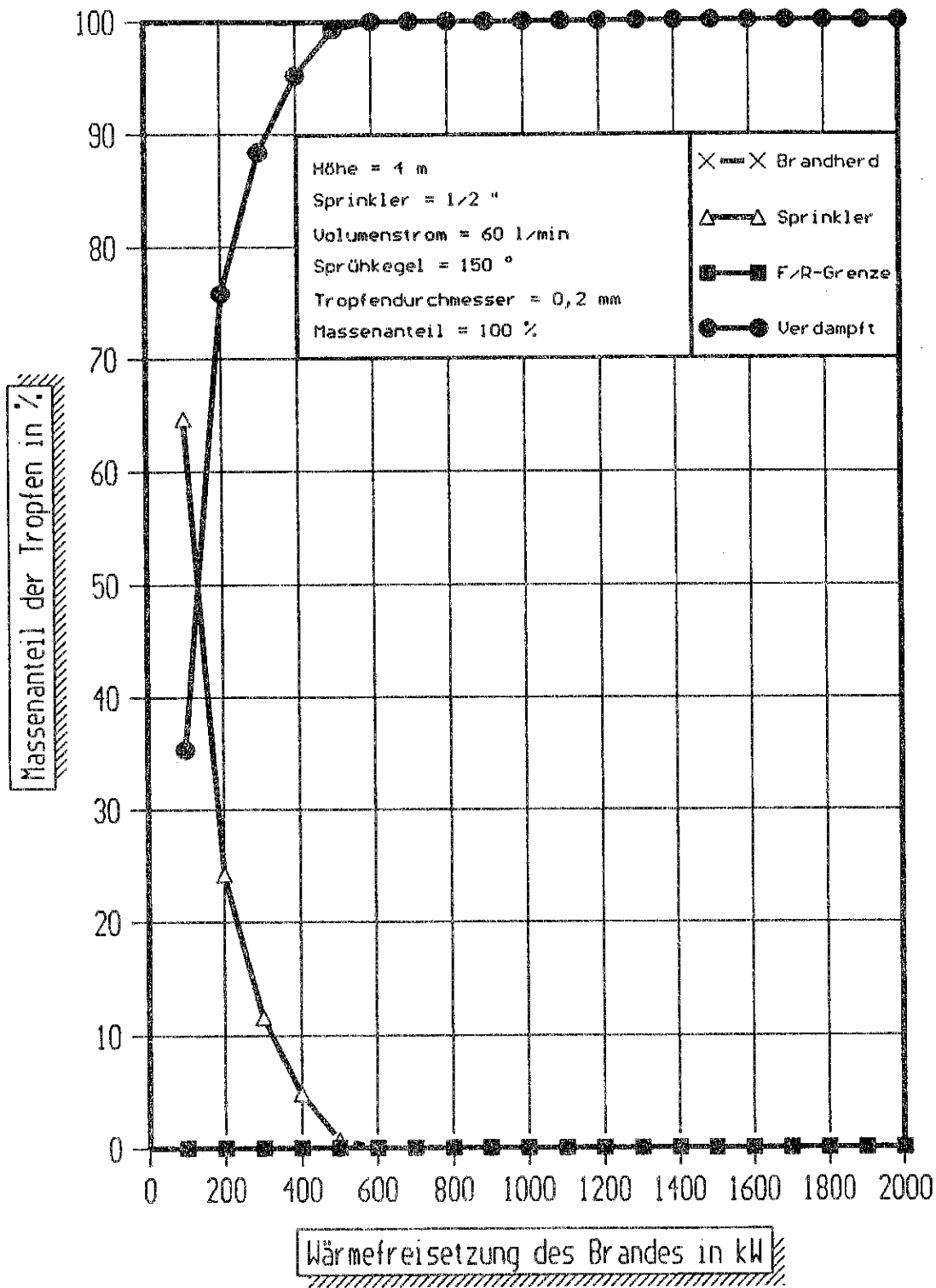


Bild 6.1 Tropfenbilanz von 0,2 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

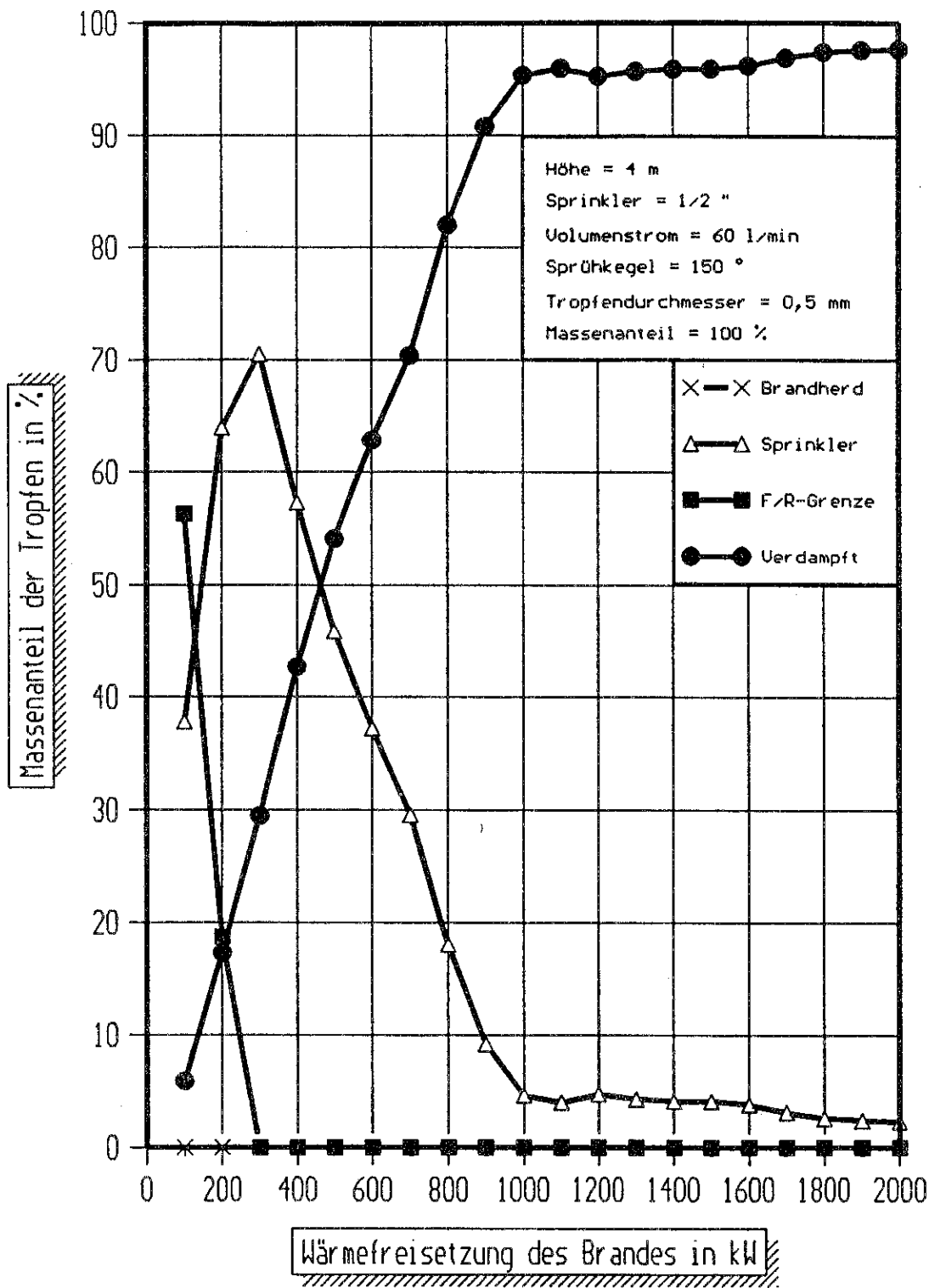


Bild 6.2 Tropfenbilanz von 0,5 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

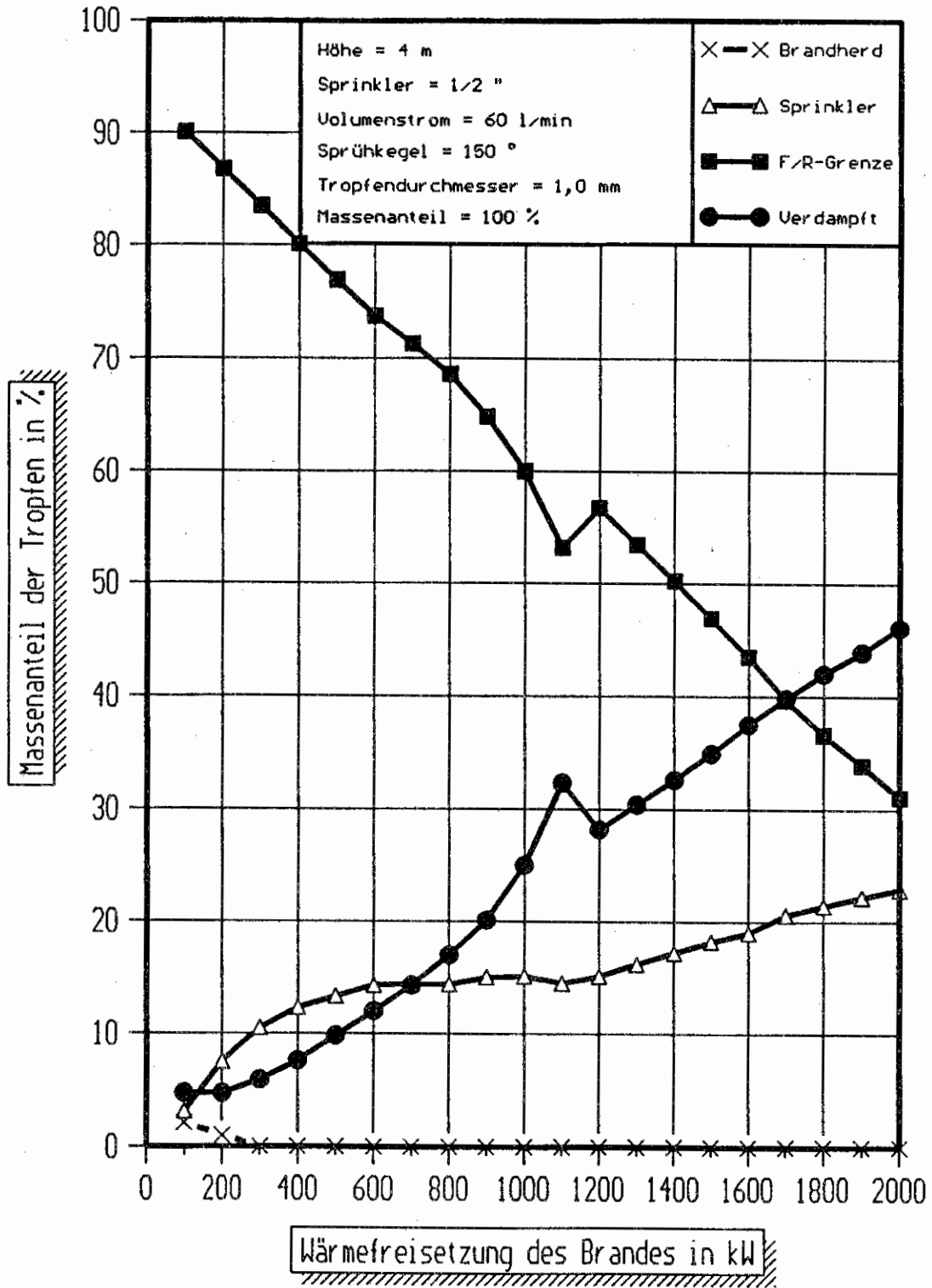


Bild 6.3 Tropfenbilanz von 1,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

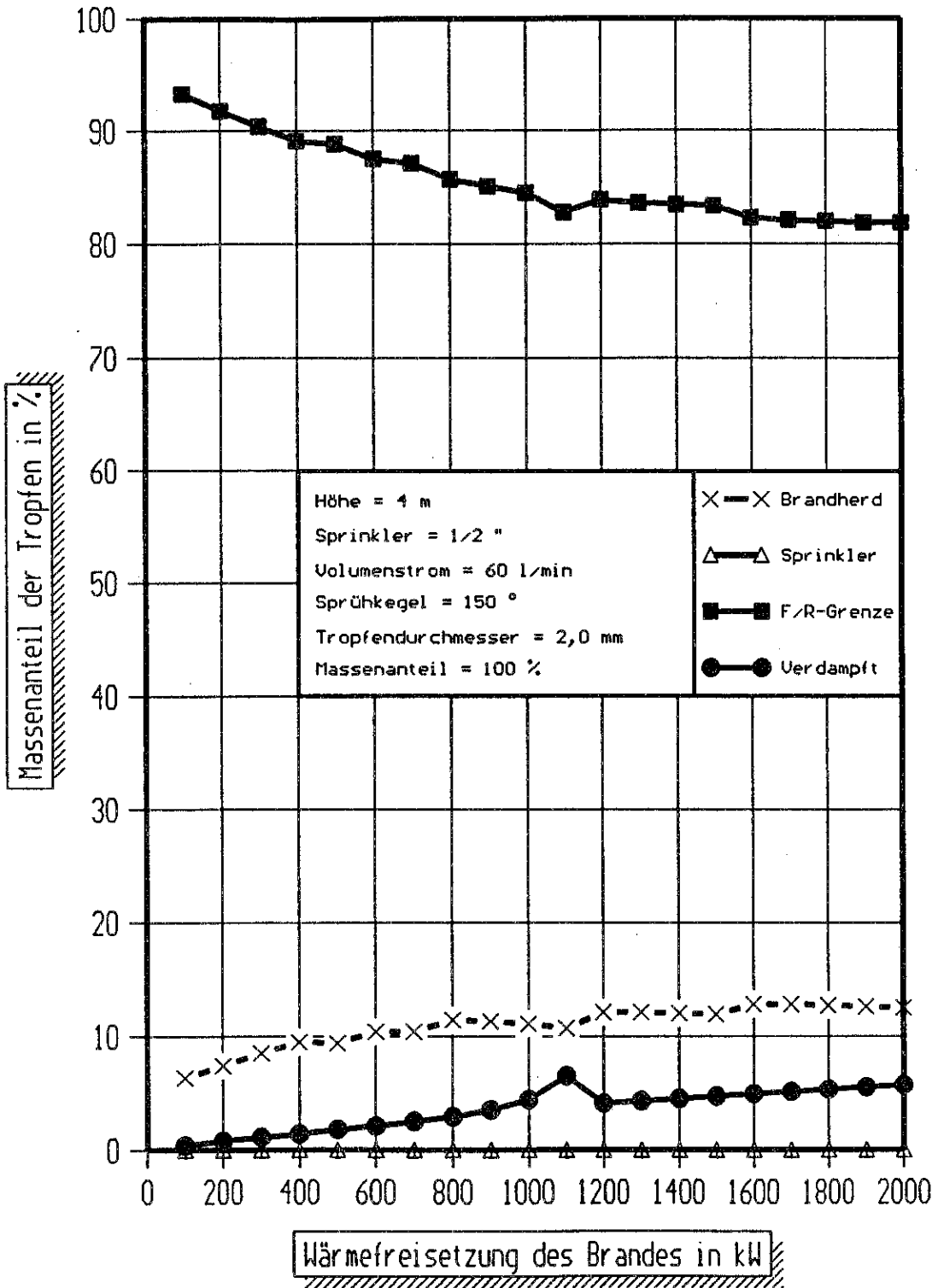


Bild 6.4 Tropfenbilanz von 2,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

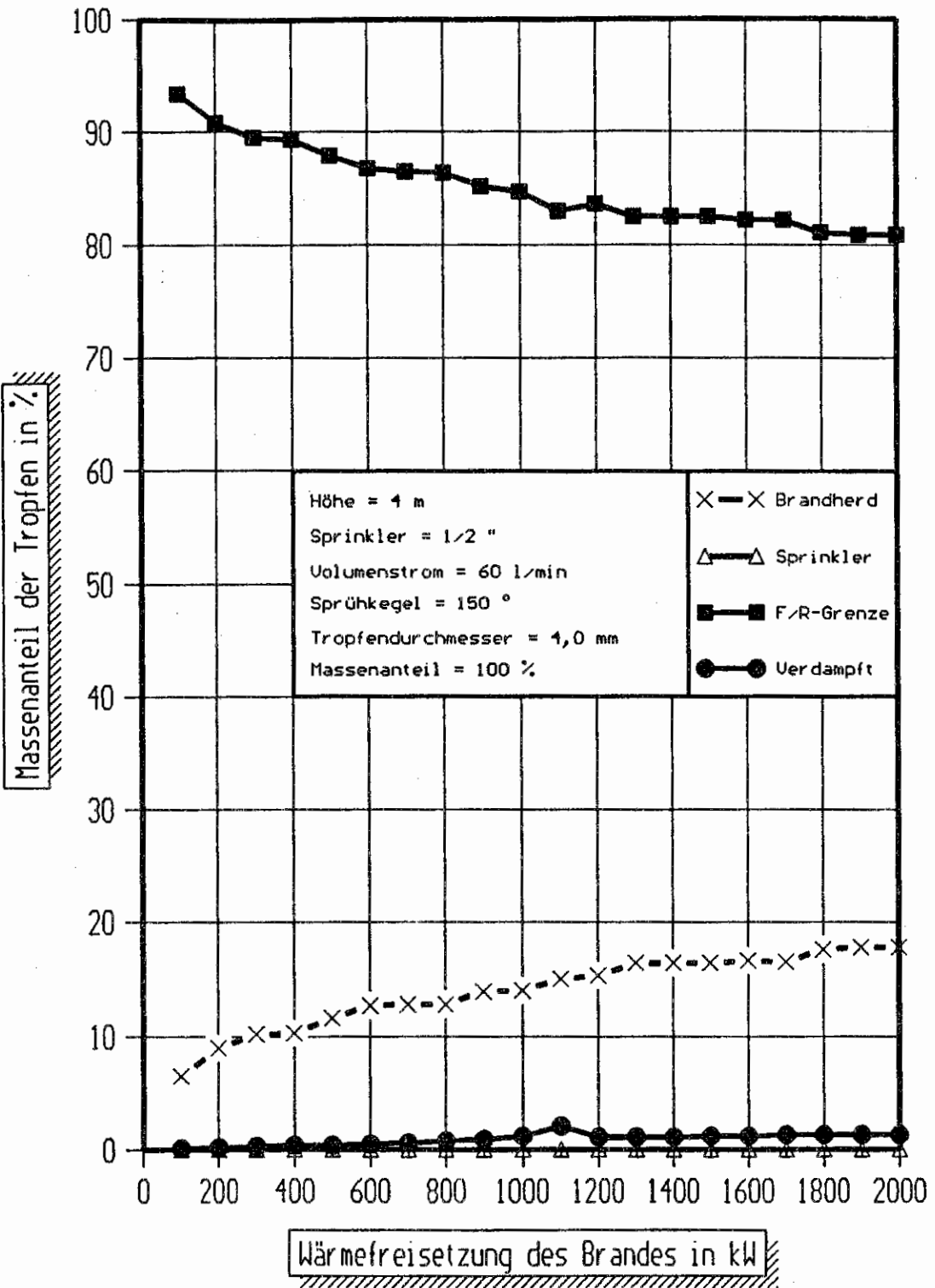


Bild 6.5 Tropfenbilanz von 4,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

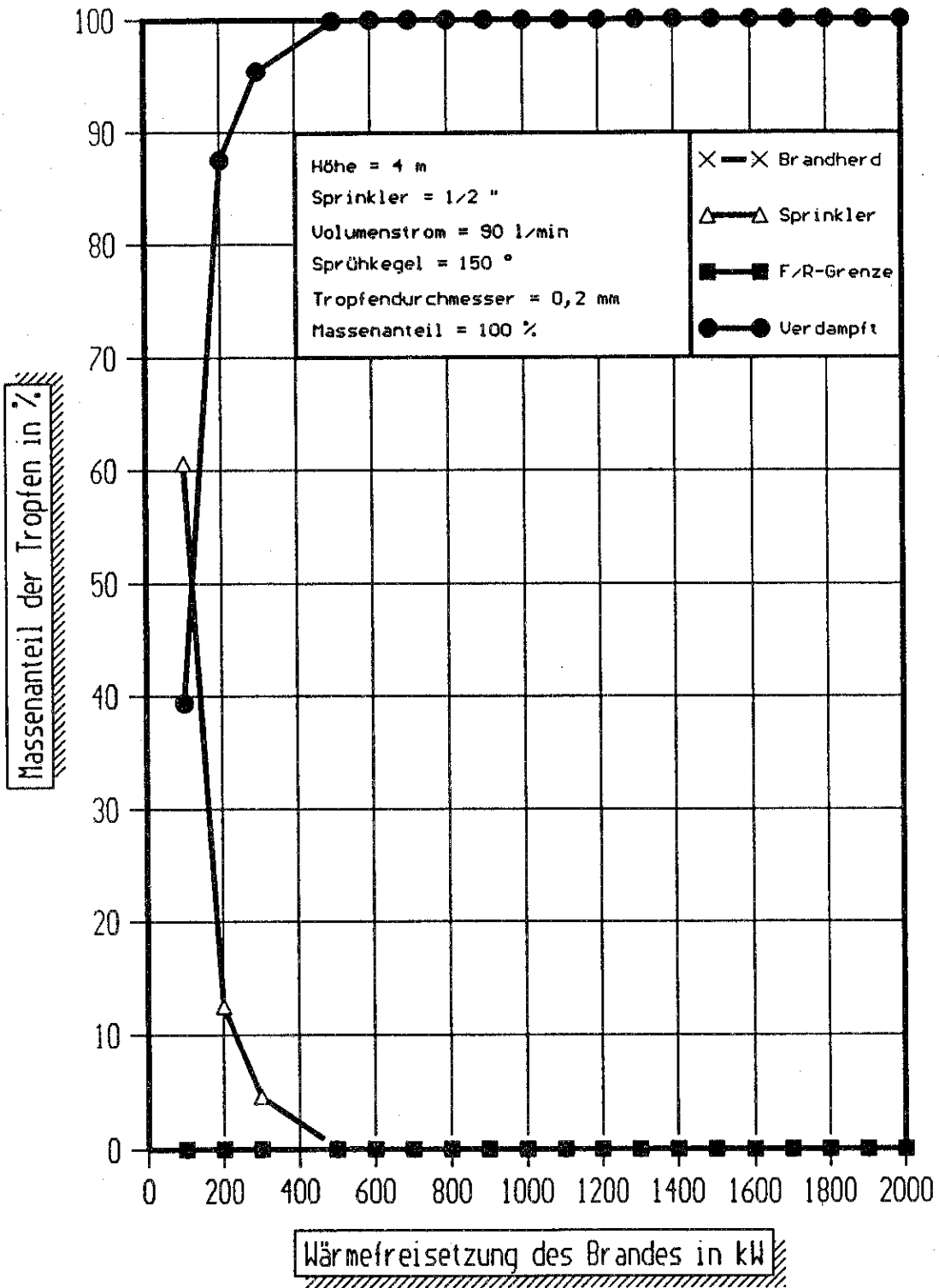


Bild 7.1 Tropfenbilanz von 0,2 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

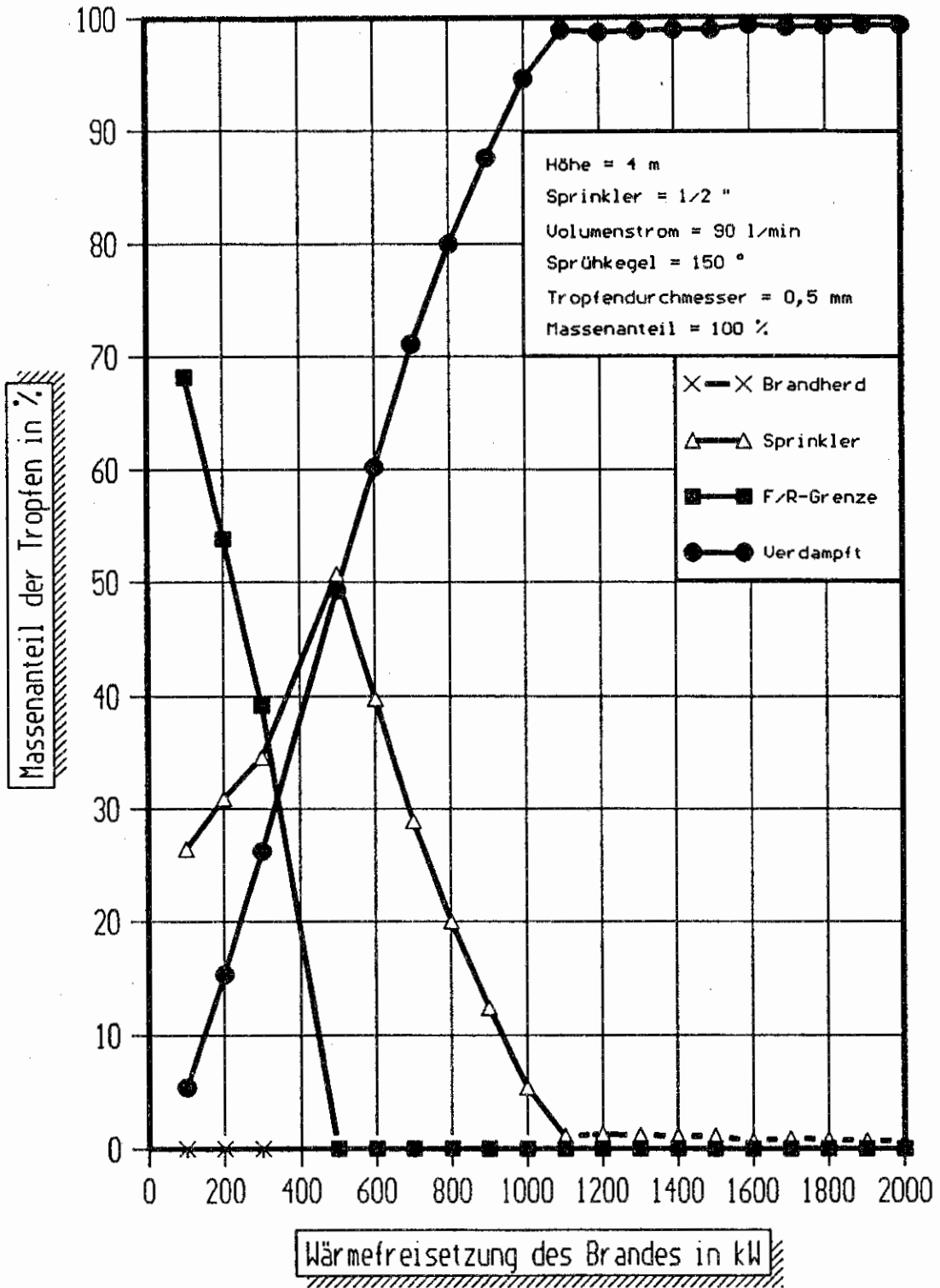


Bild 7.2 Tropfenbilanz von 0,5 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

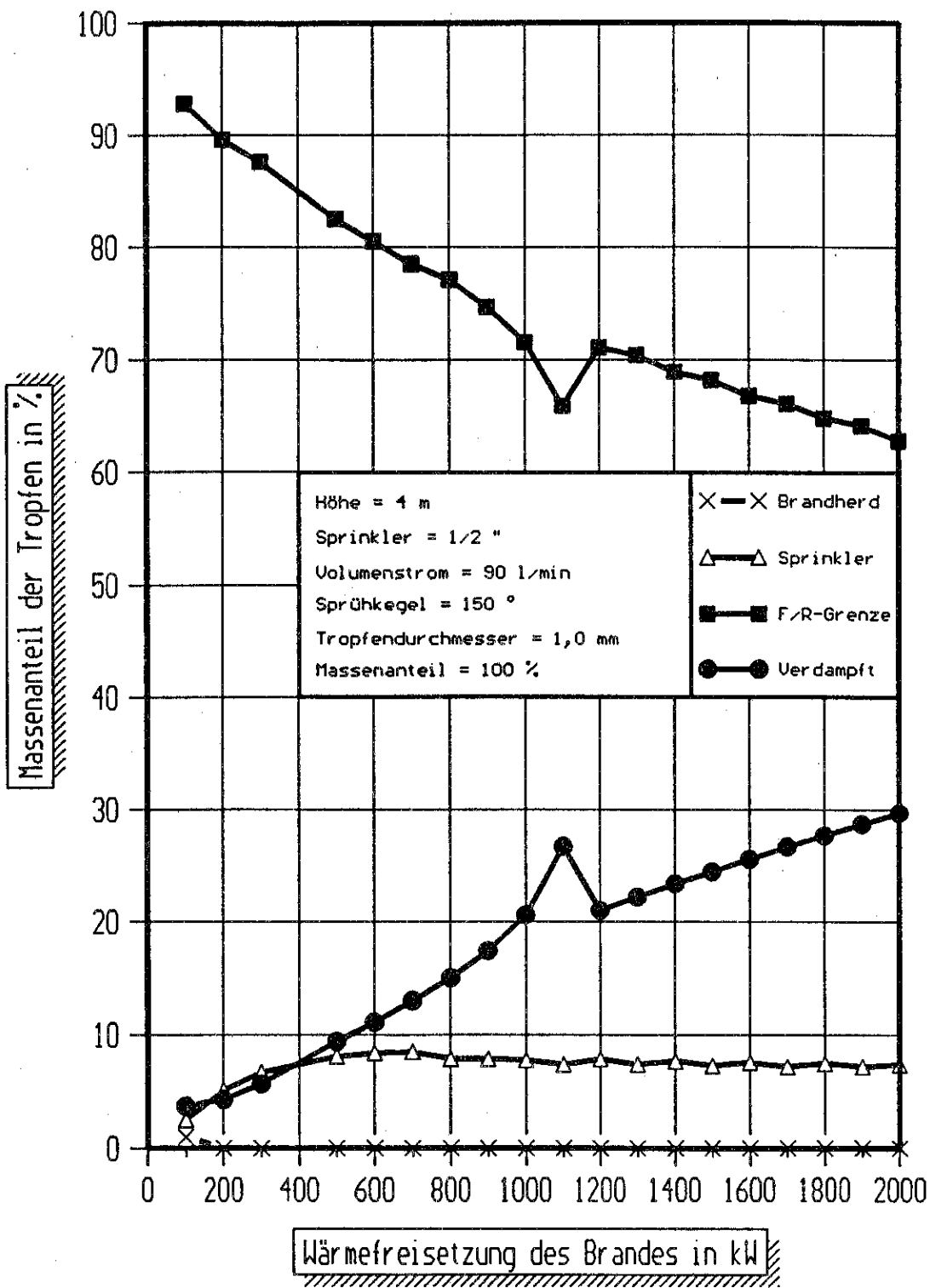


Bild 7.3 Tropfenbilanz von 1,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

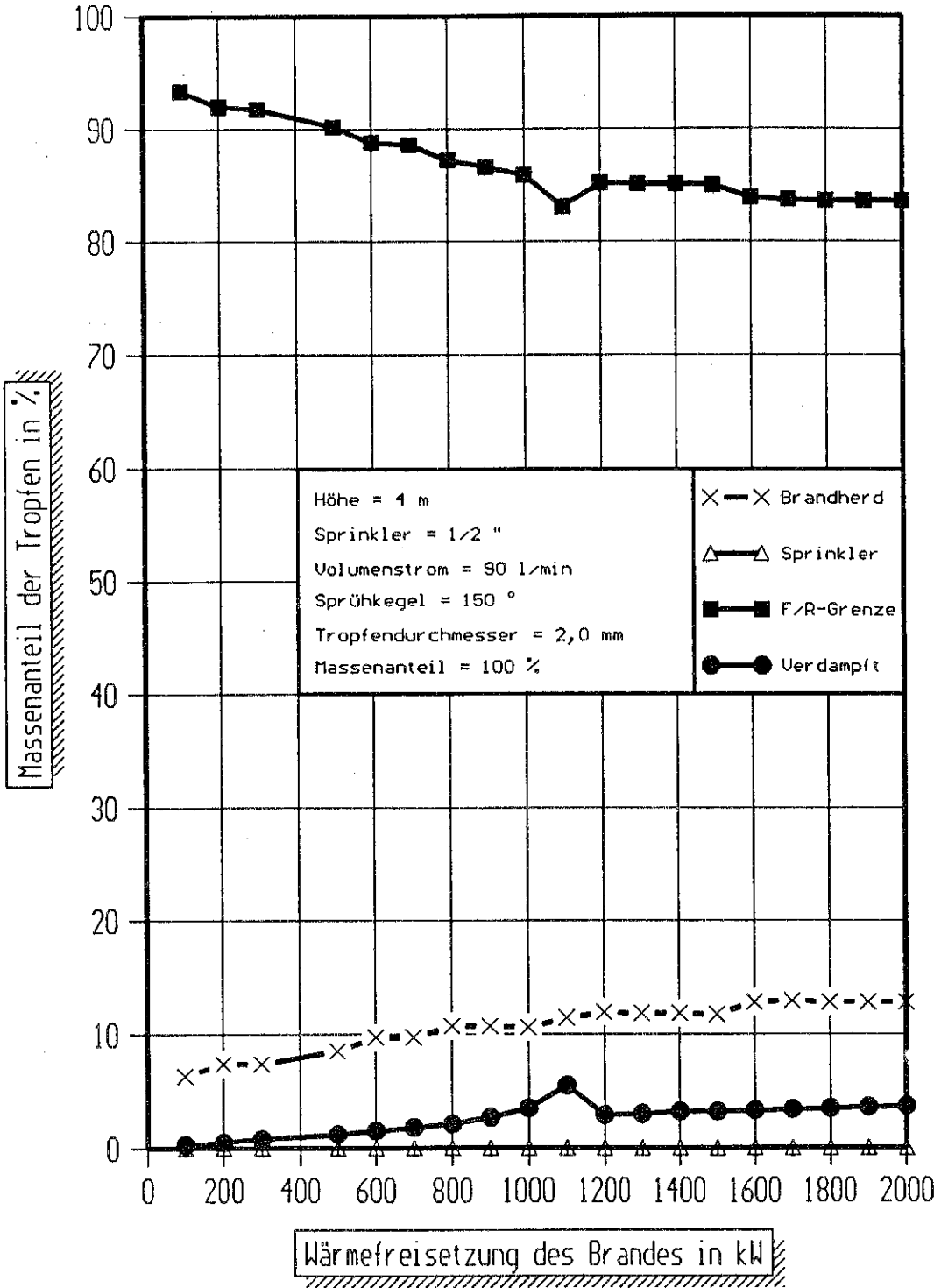


Bild 7.4 Tropfenbilanz von 2,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

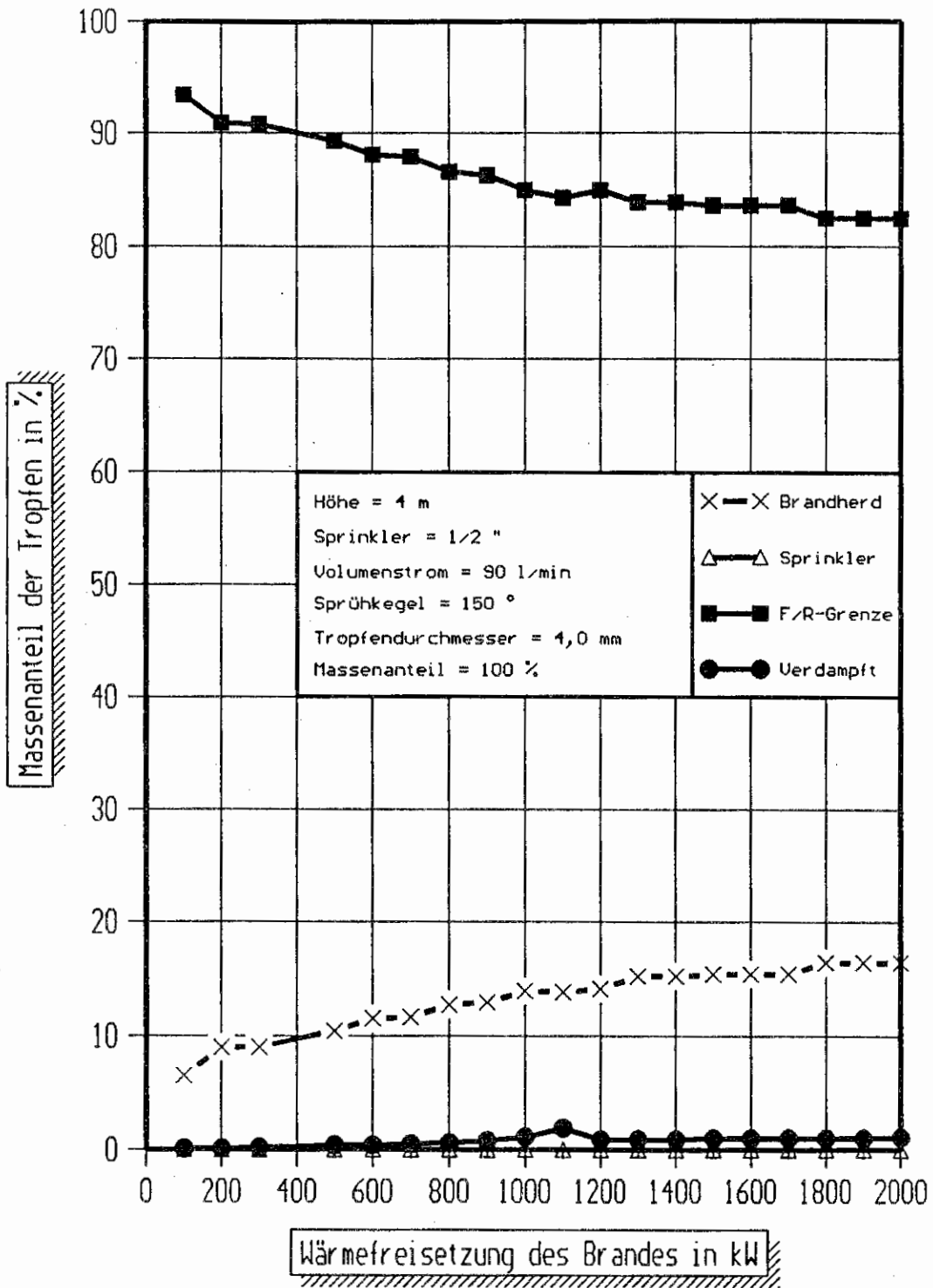


Bild 7.5 Tropfenbilanz von 4,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

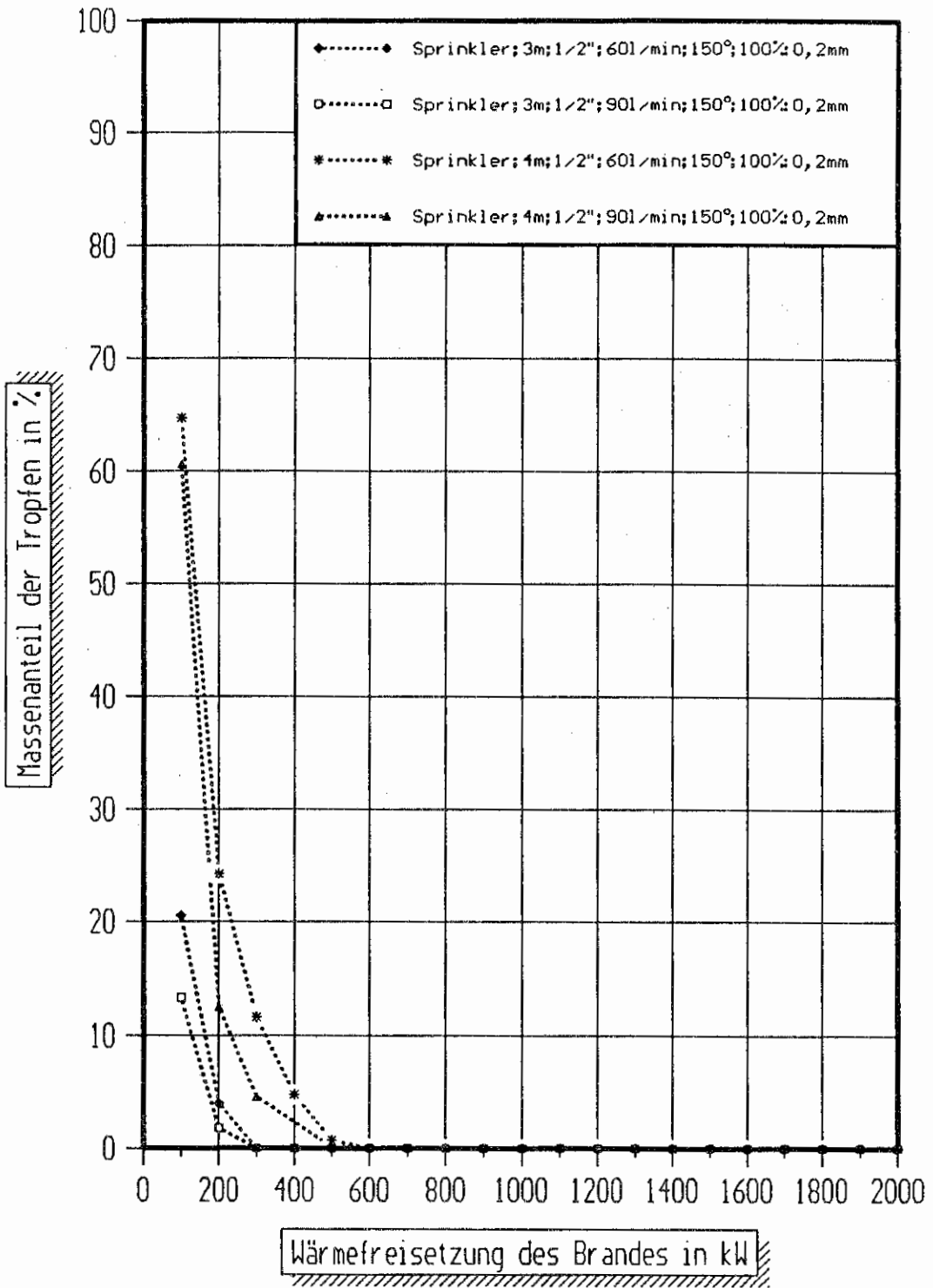


Bild 8.1 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die durch die Auftriebsströmung den **Sprinkler** wieder erreichen bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den **Tropfendurchmesser 0,2 mm**.

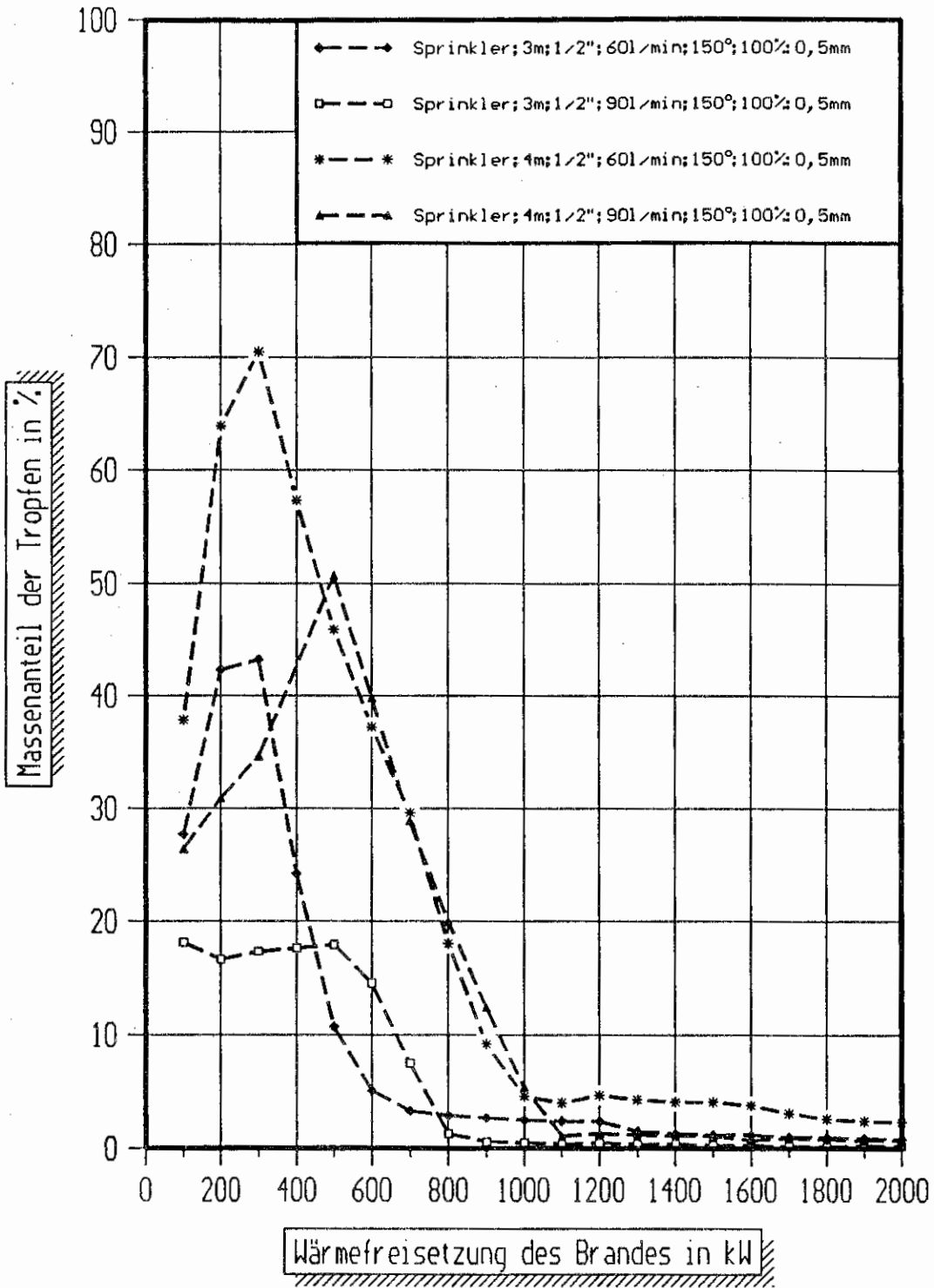


Bild 8.2 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die durch die Auftriebsströmung den Sprinkler wieder erreichen bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 0,5 mm.

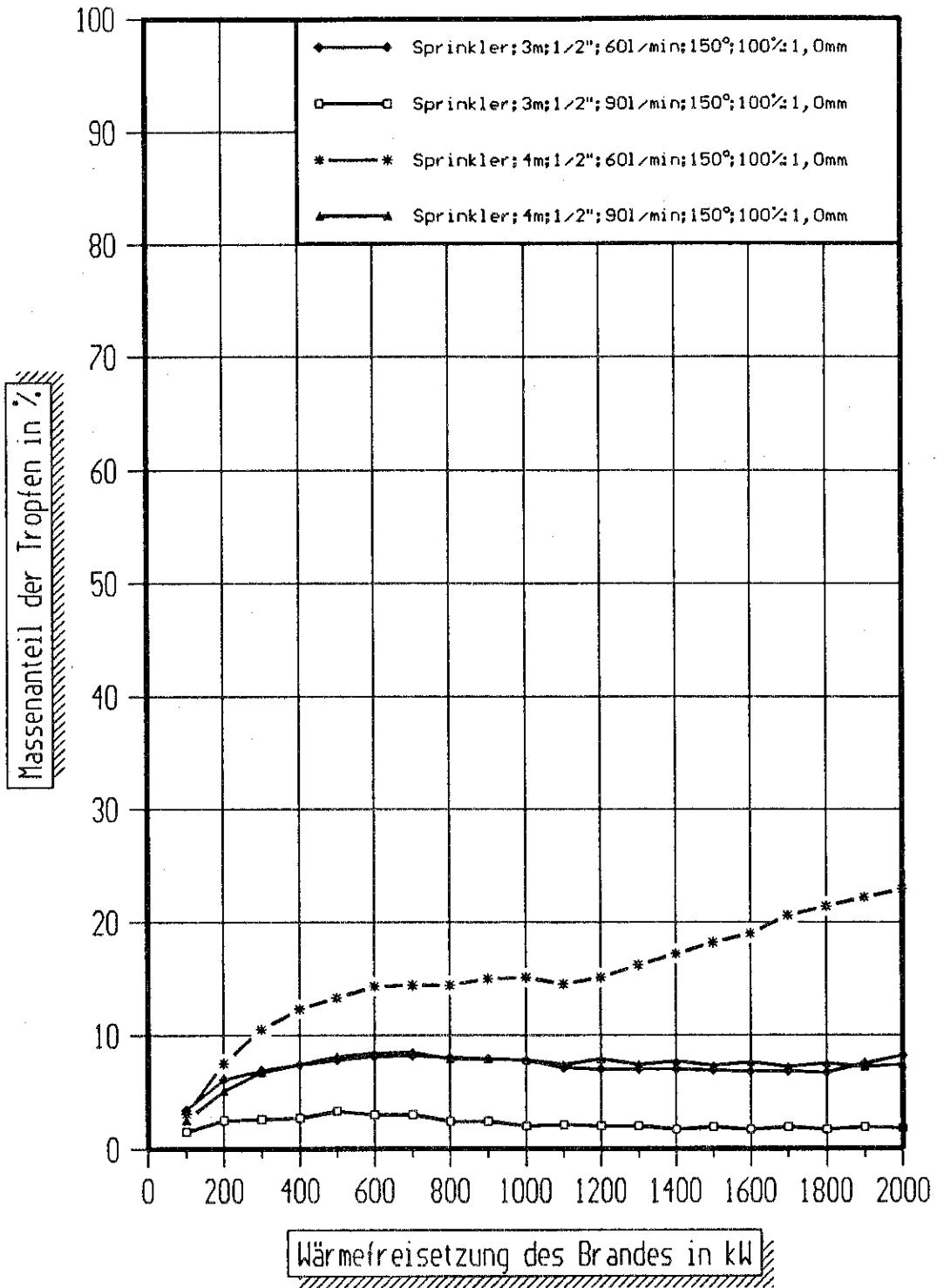


Bild 8.3 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die durch die Auftriebsströmung den Sprinkler wieder erreichen bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 1,0 mm.

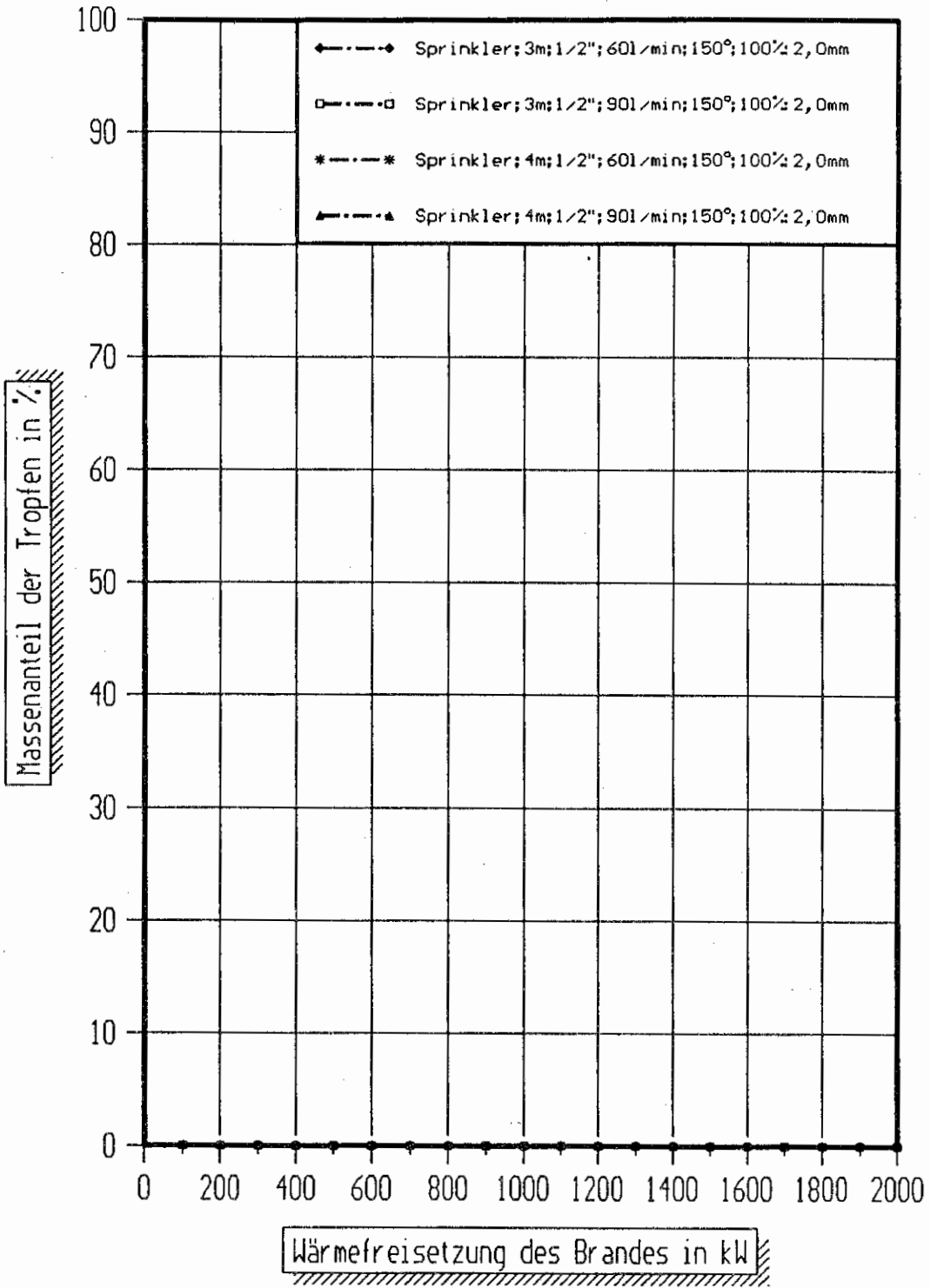


Bild 8.4 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die durch die Auftriebsströmung den **Sprinkler** wieder erreichen bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den **Tropfendurchmesser 2,0 mm**.

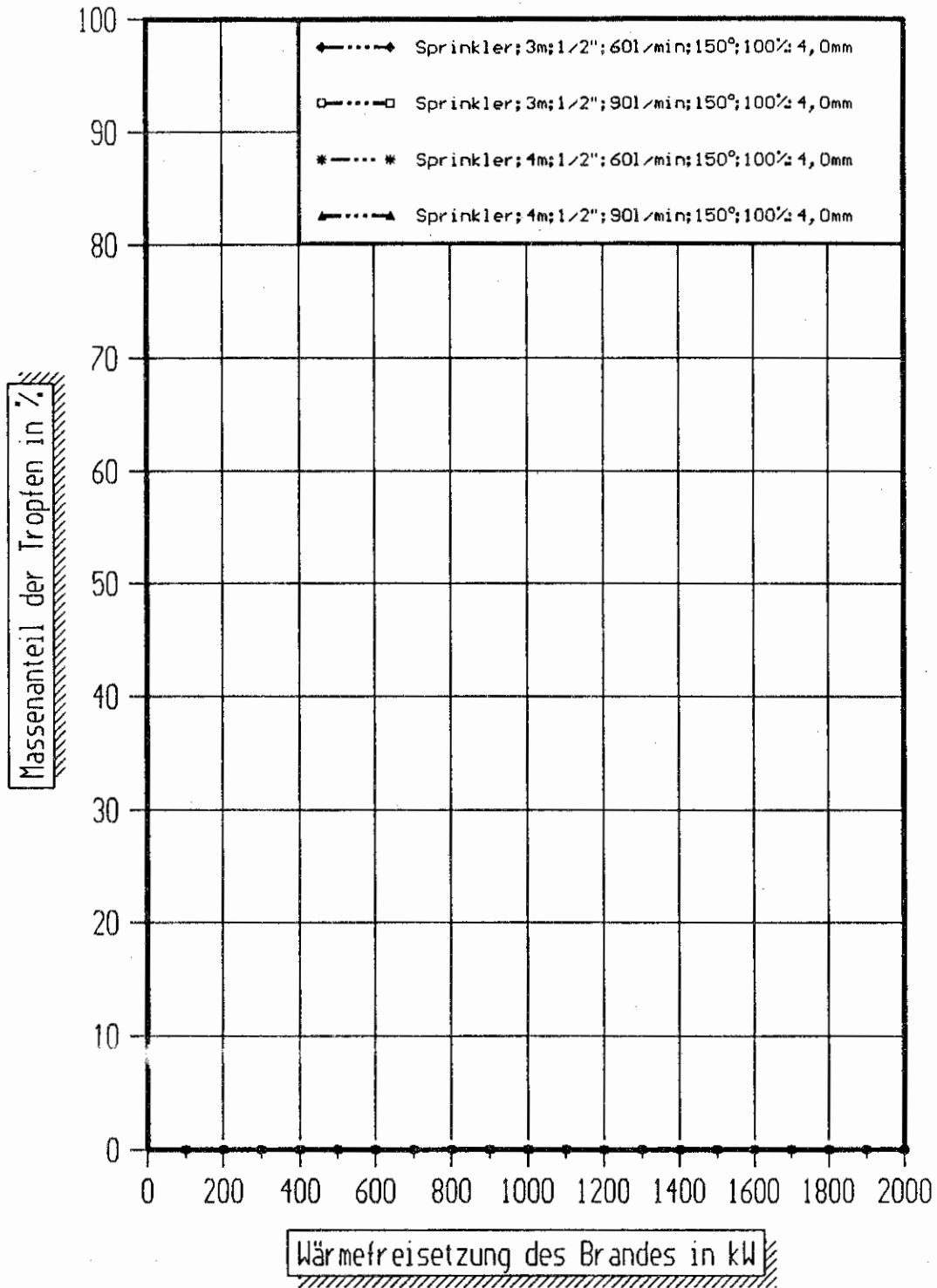


Bild 8.5 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die durch die Auftriebsströmung den Sprinkler wieder erreichen bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 4,0 mm.

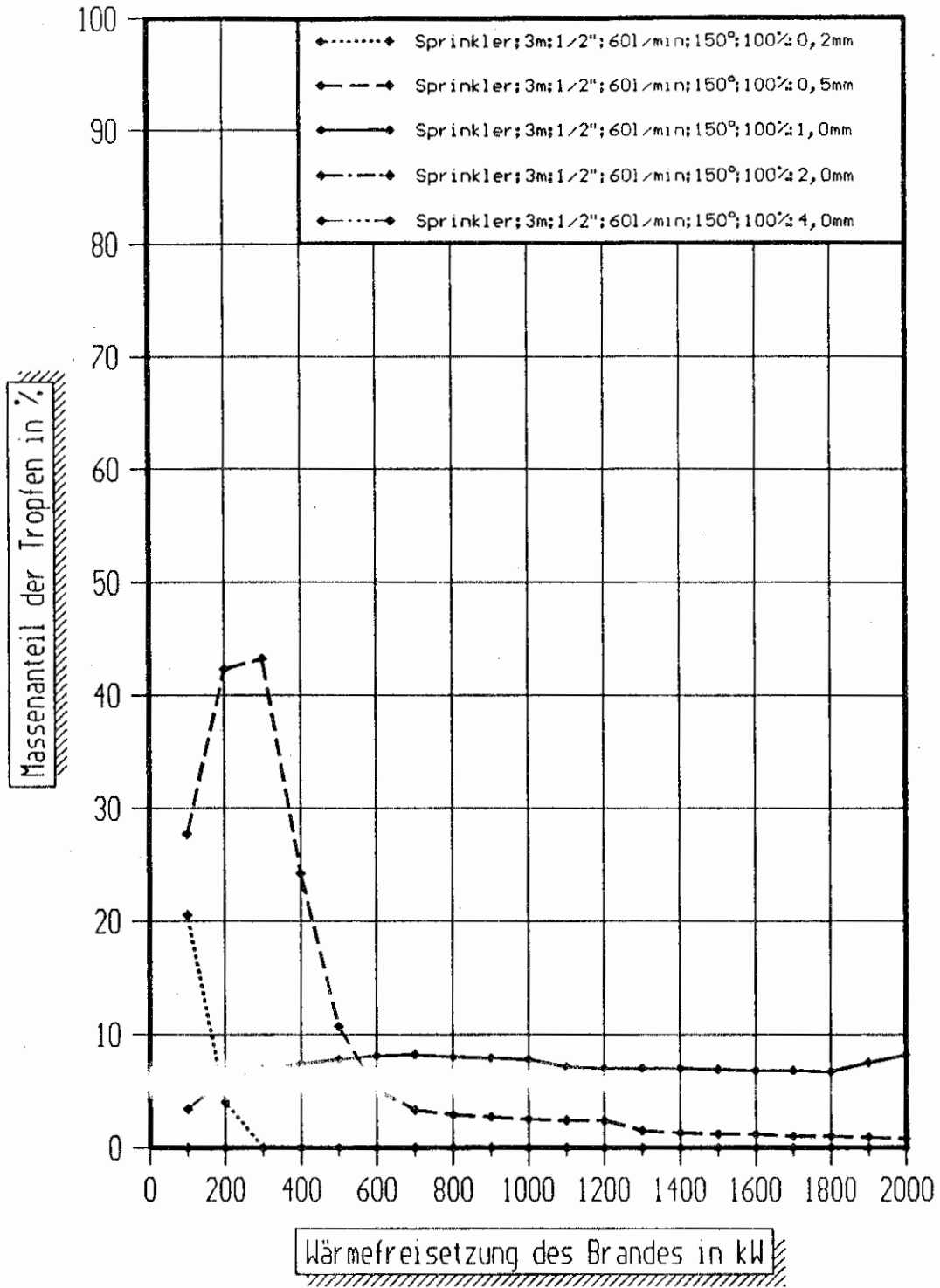


Bild 9.1 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die durch die Auftriebsströmung den Sprinkler wieder erreichen für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

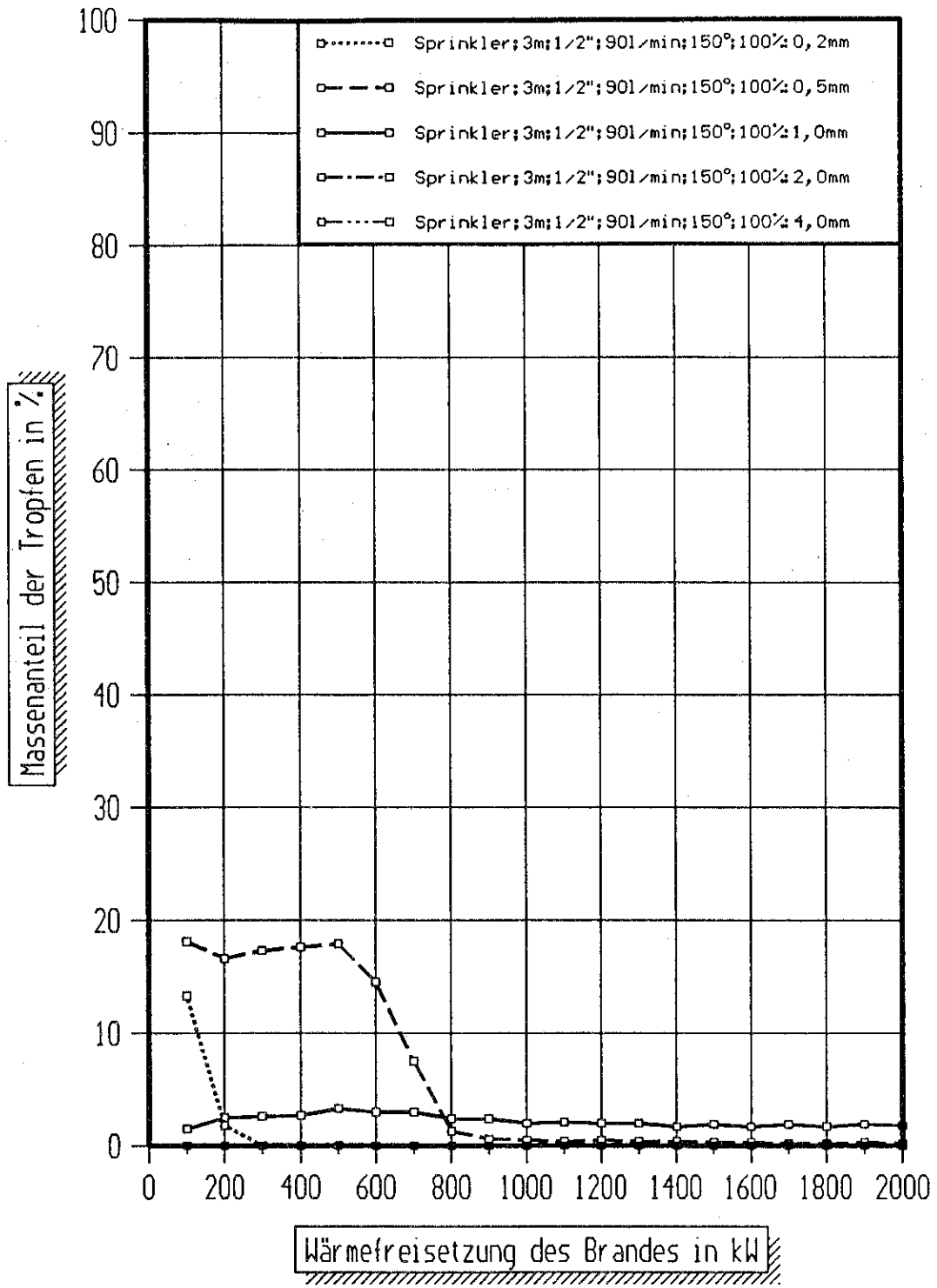


Bild 9.2 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die durch die Auftriebsströmung den Sprinkler wieder erreichen für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

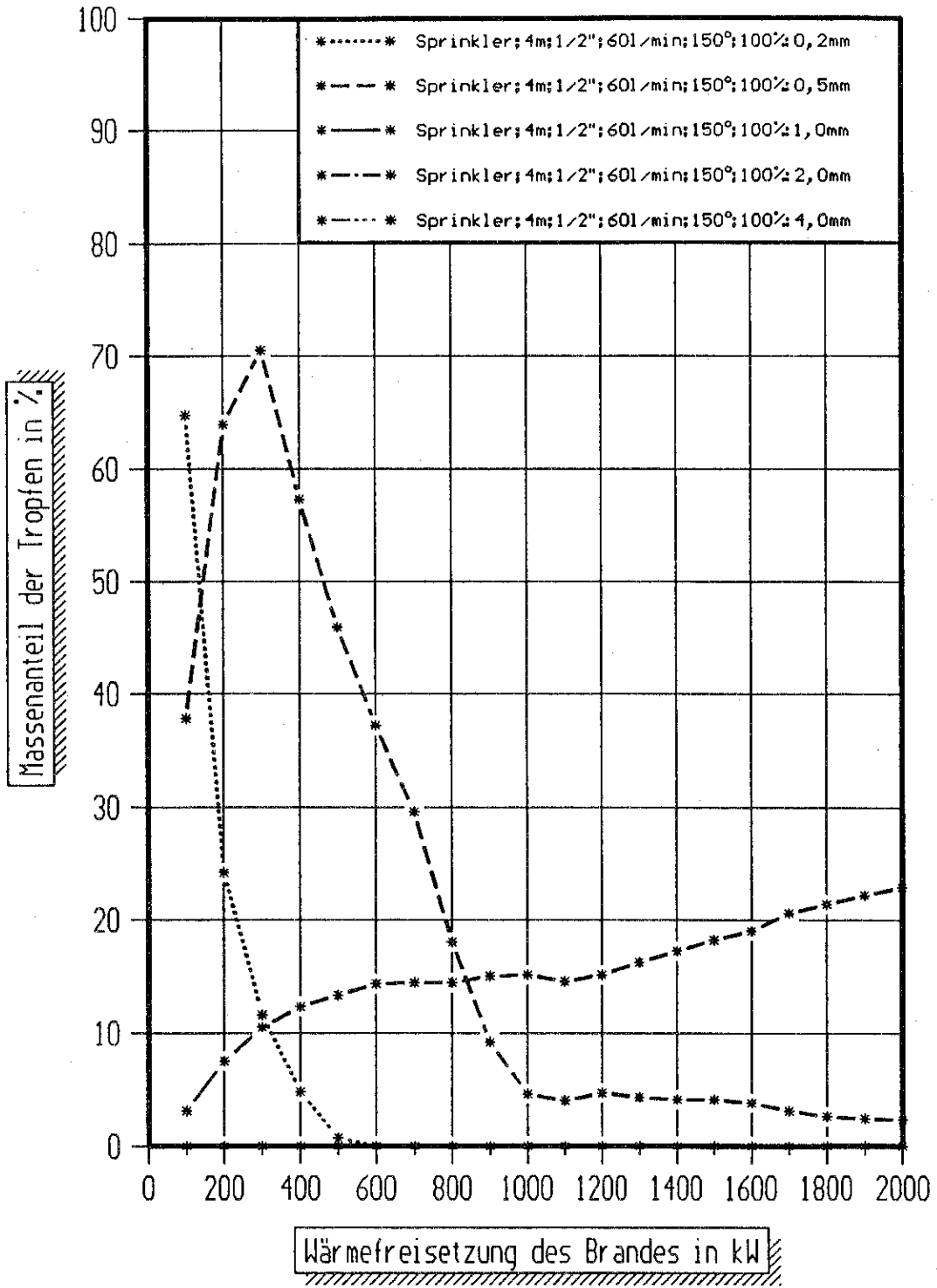


Bild 9.3 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die durch die Auftriebsströmung den Sprinkler wieder erreichen für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

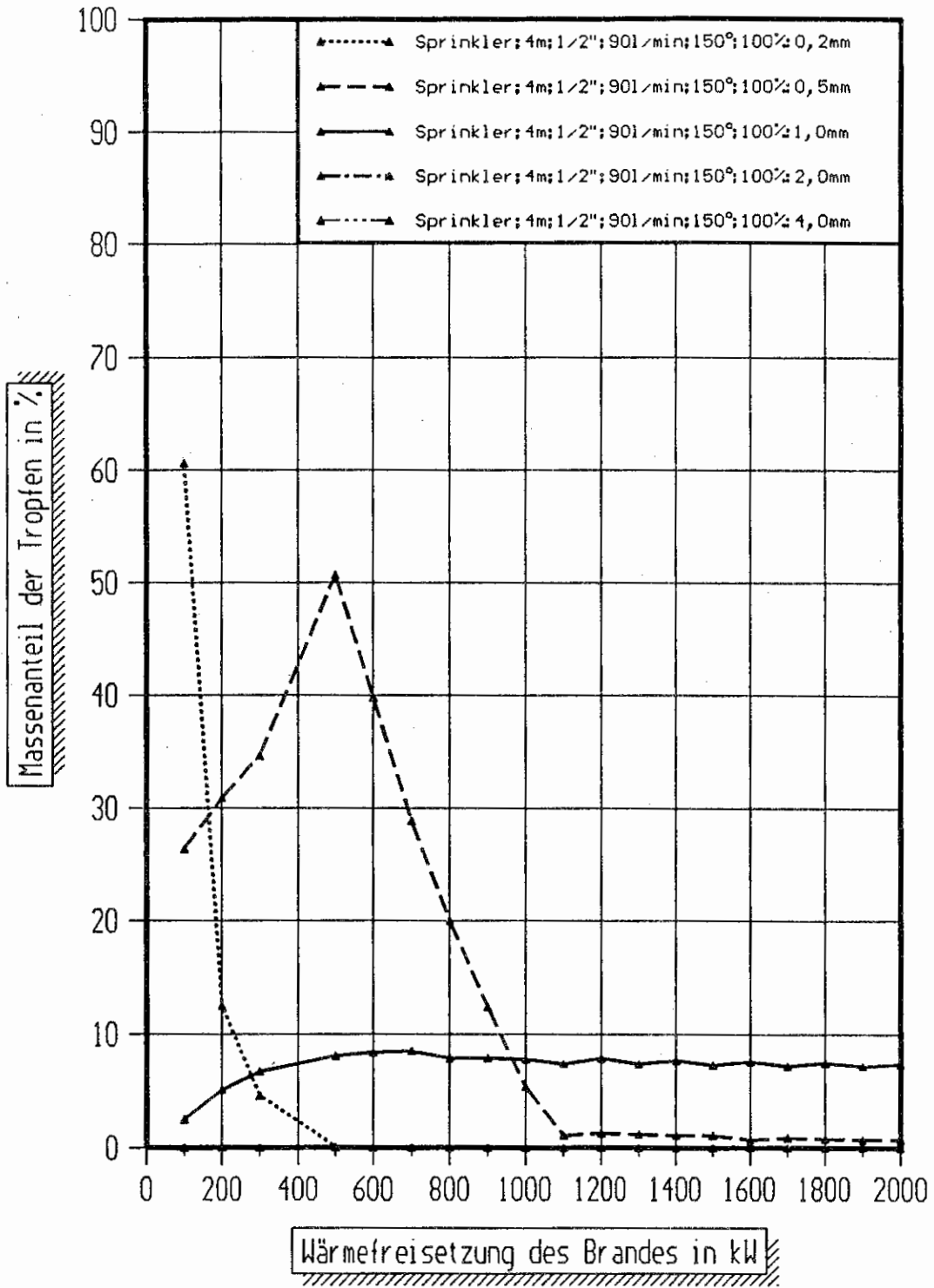


Bild 9.4 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die durch die Auftriebsströmung den Sprinkler wieder erreichen für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

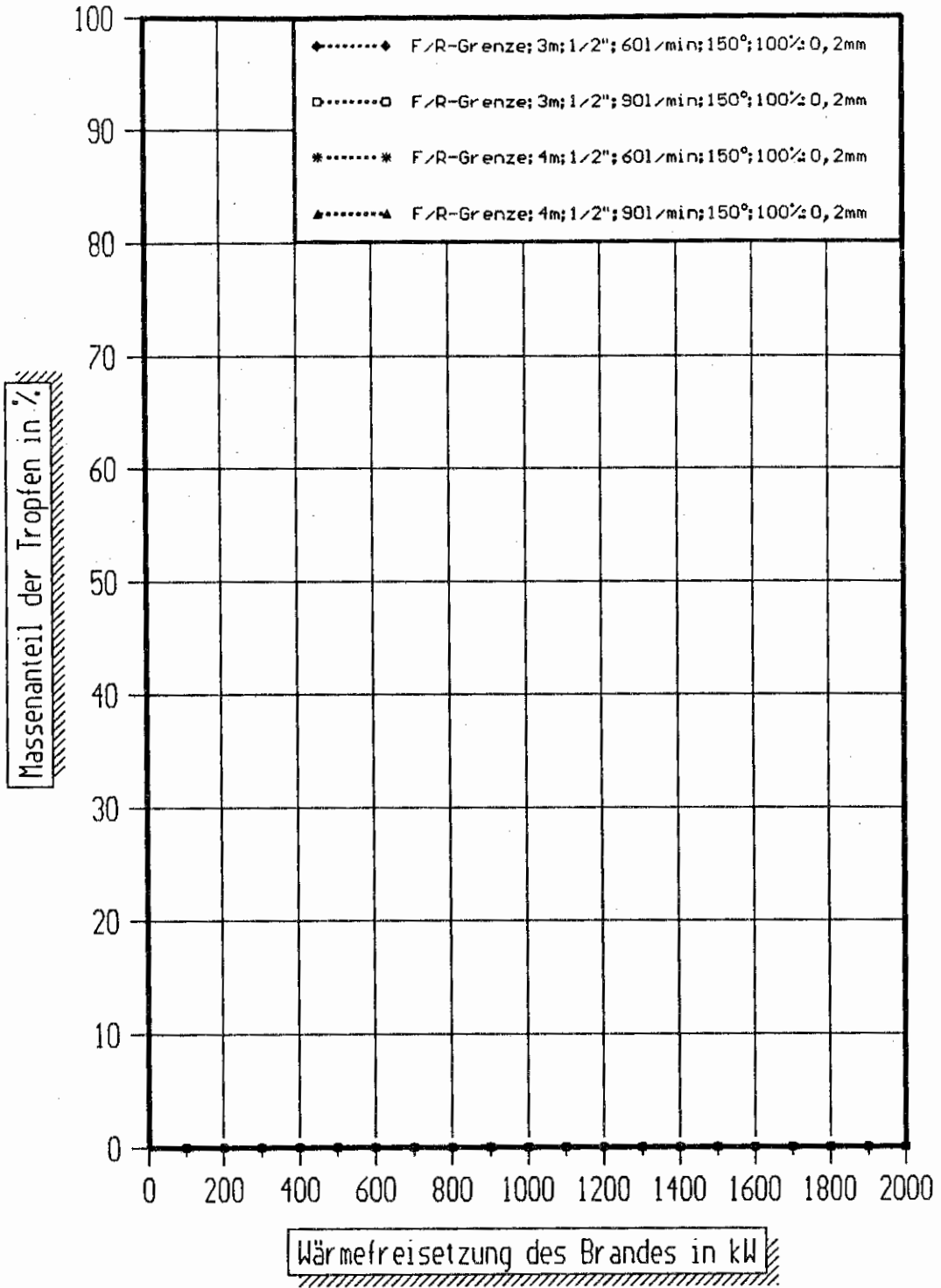


Bild 10.1 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die die F/R-Grenze überschreiten bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 0,2 mm.

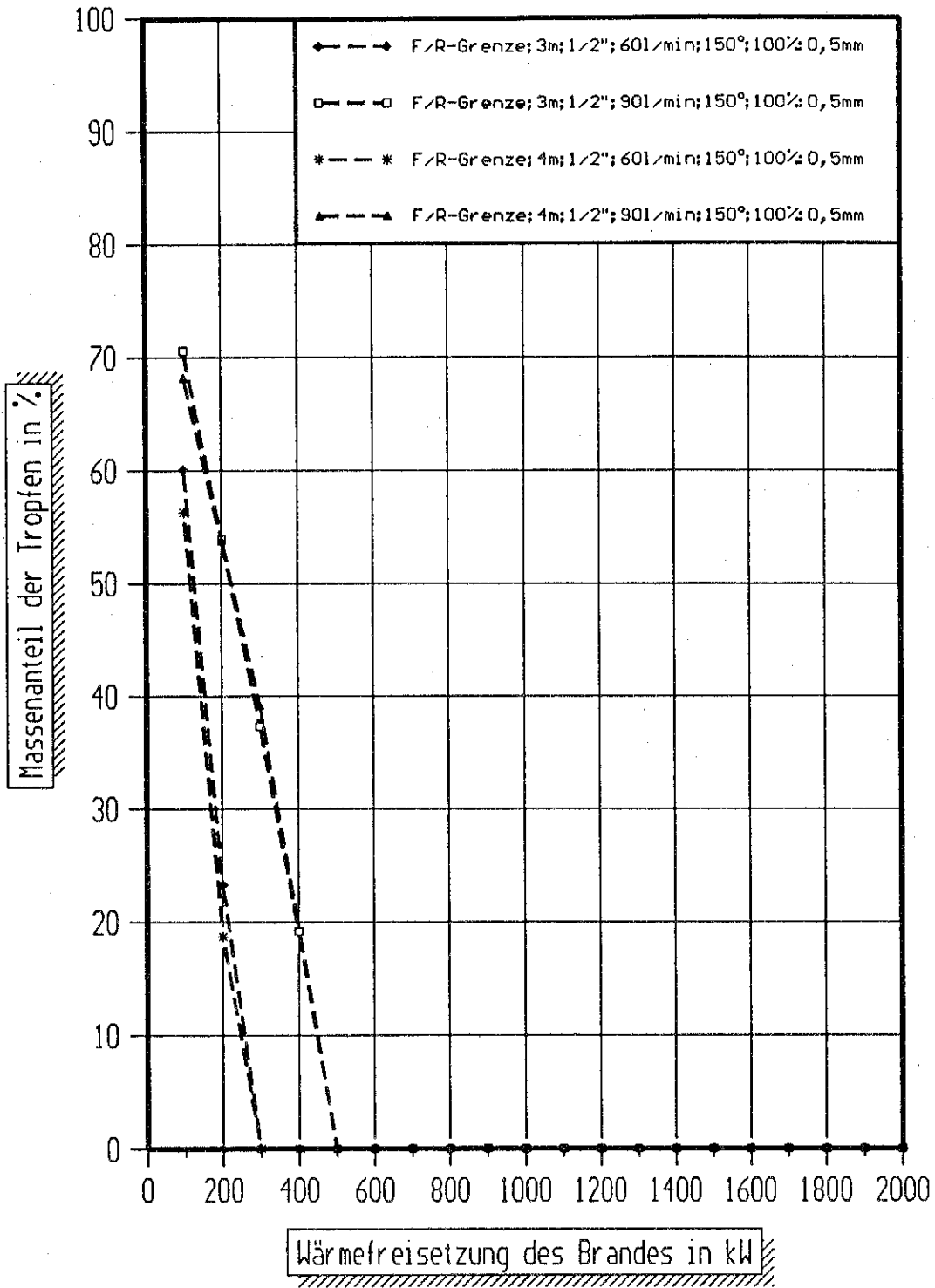


Bild 10.2 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die die F/R-Grenze überschreiten bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 0,5 mm.

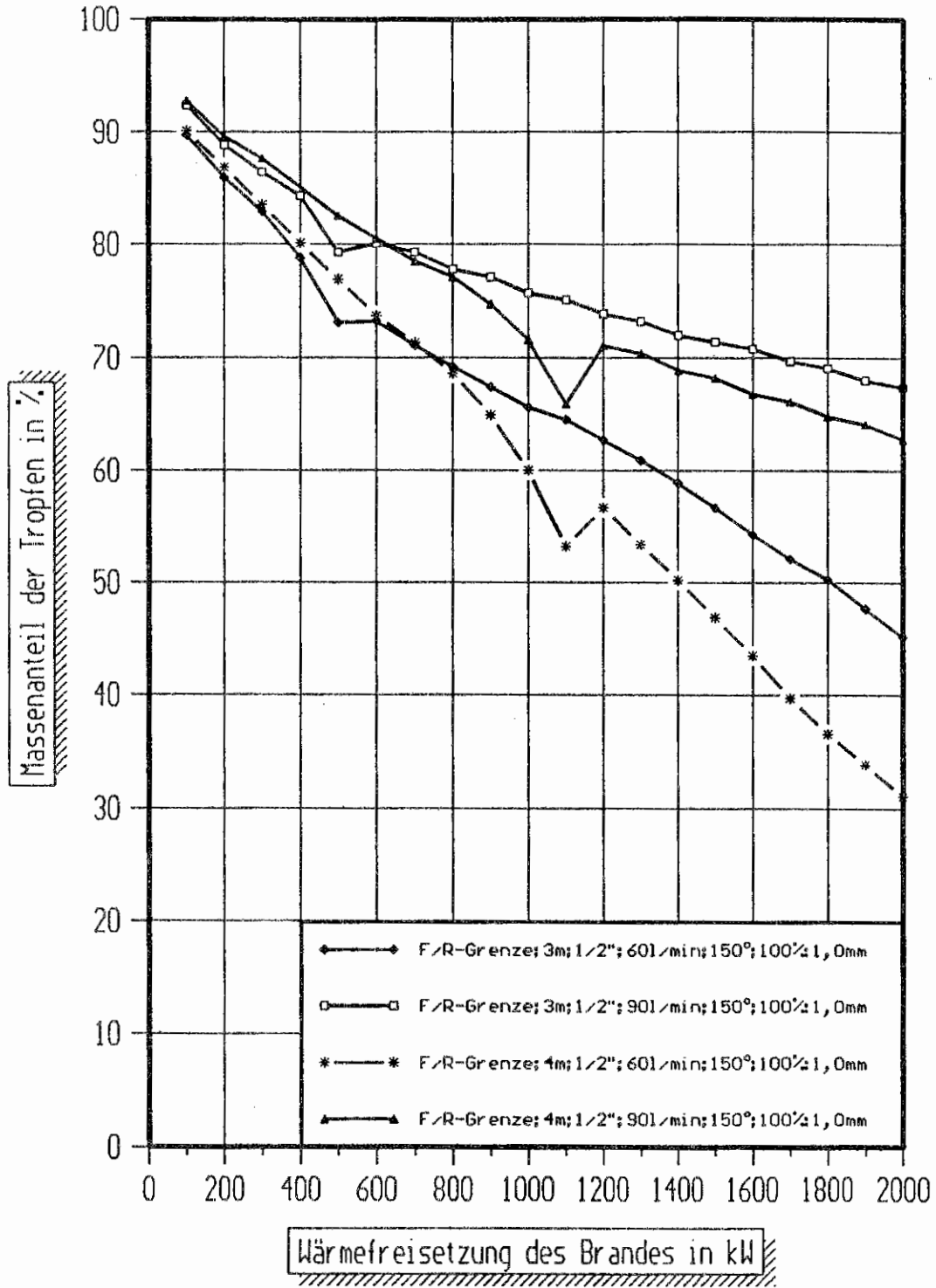


Bild 10.3 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die die F/R-Grenze überschreiten bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 1,0 mm.

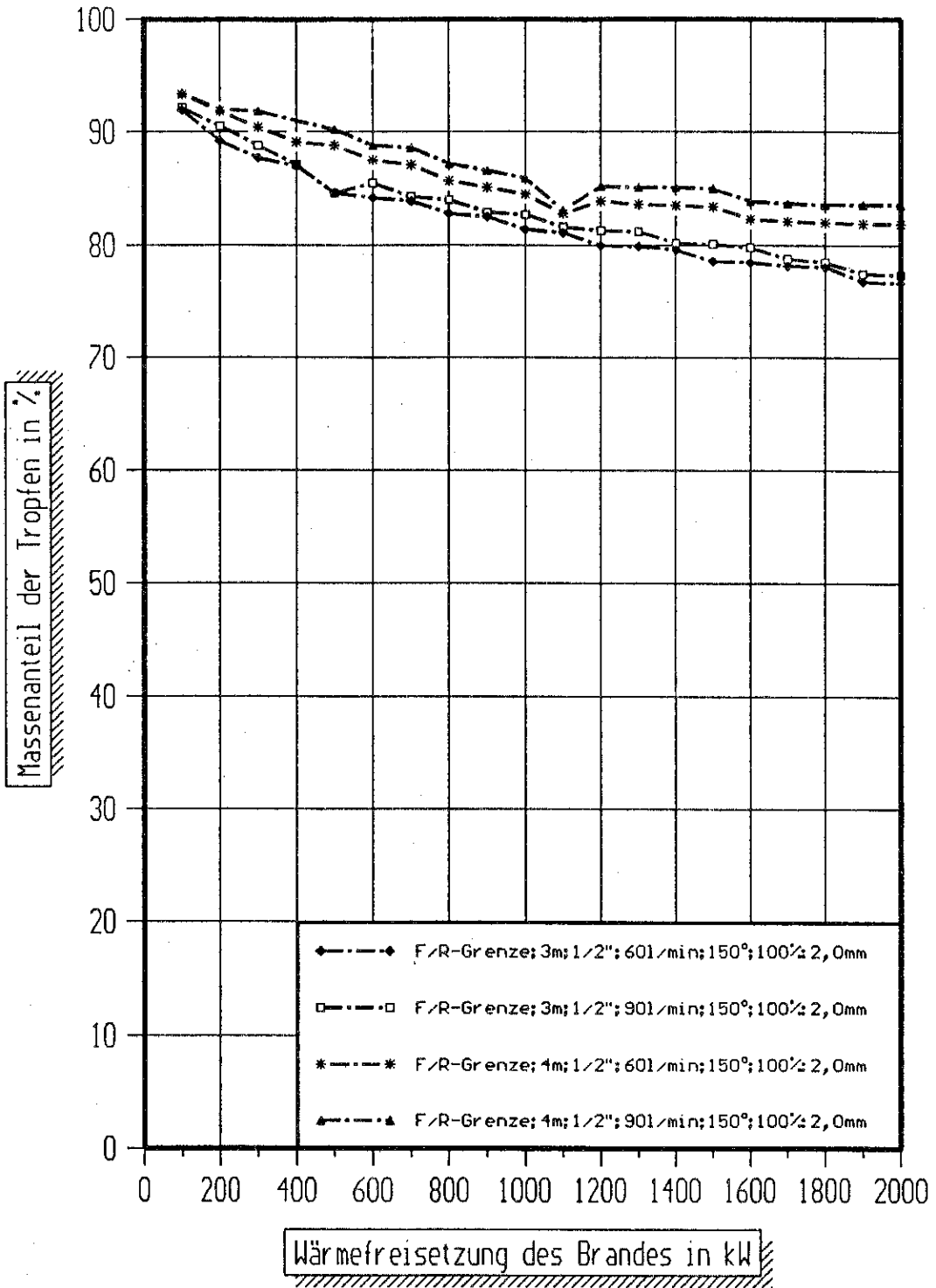


Bild 10.4 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die die F/R-Grenze überschreiten bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 2,0 mm.

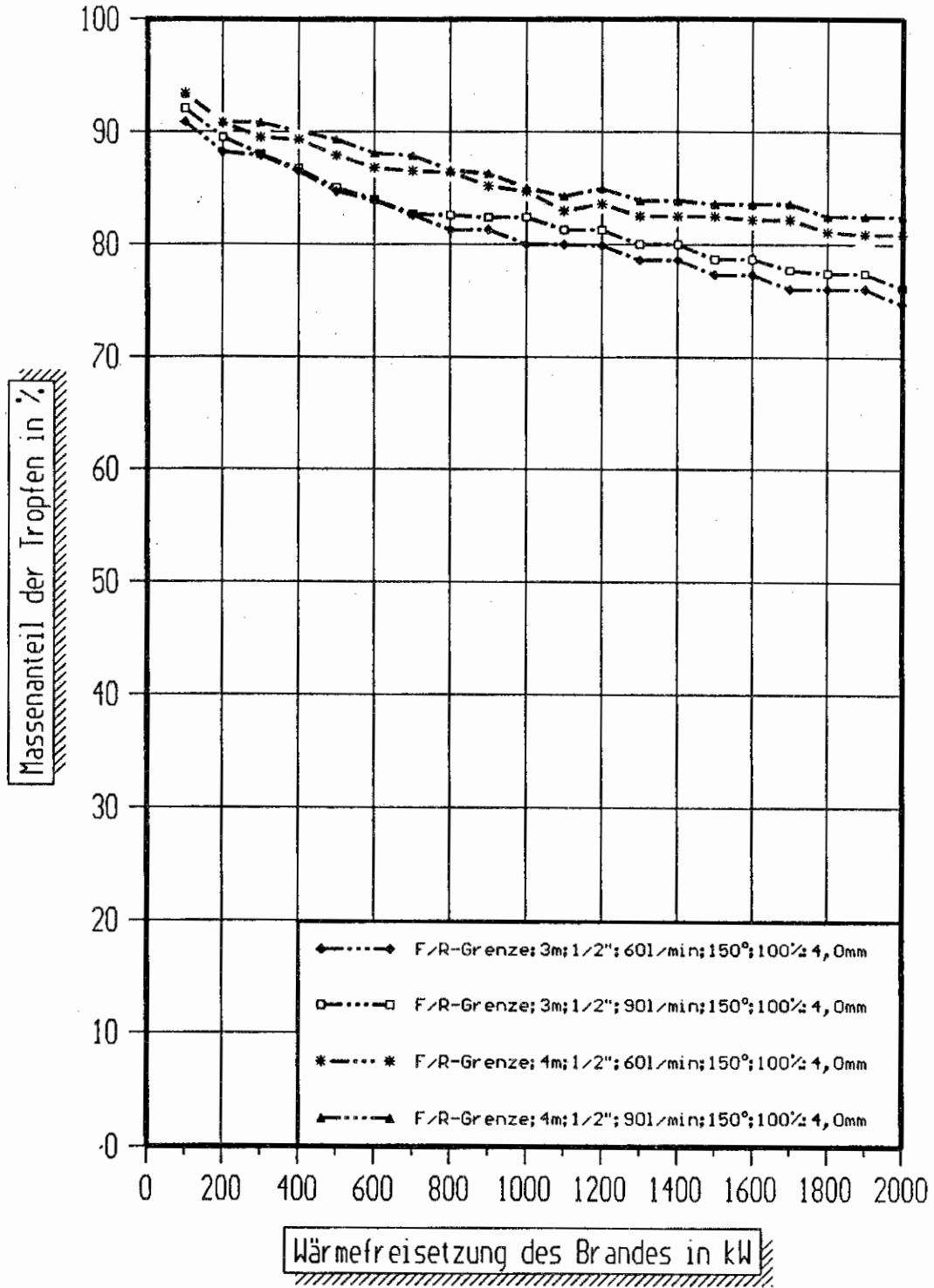


Bild 10.5 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die die F/R-Grenze überschreiten bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 4,0 mm.

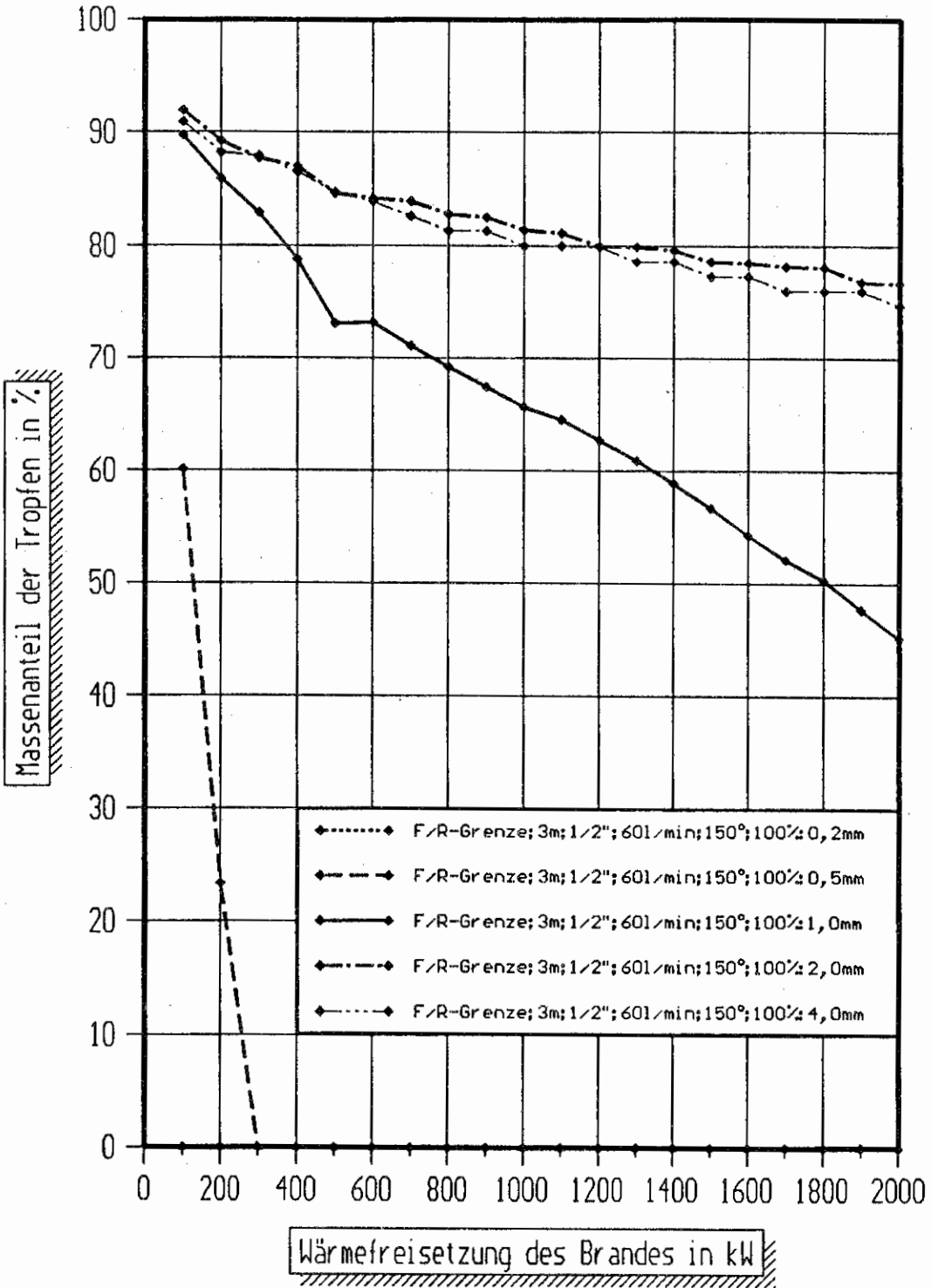


Bild 11.1 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die die F/R-Grenze überschreiten für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

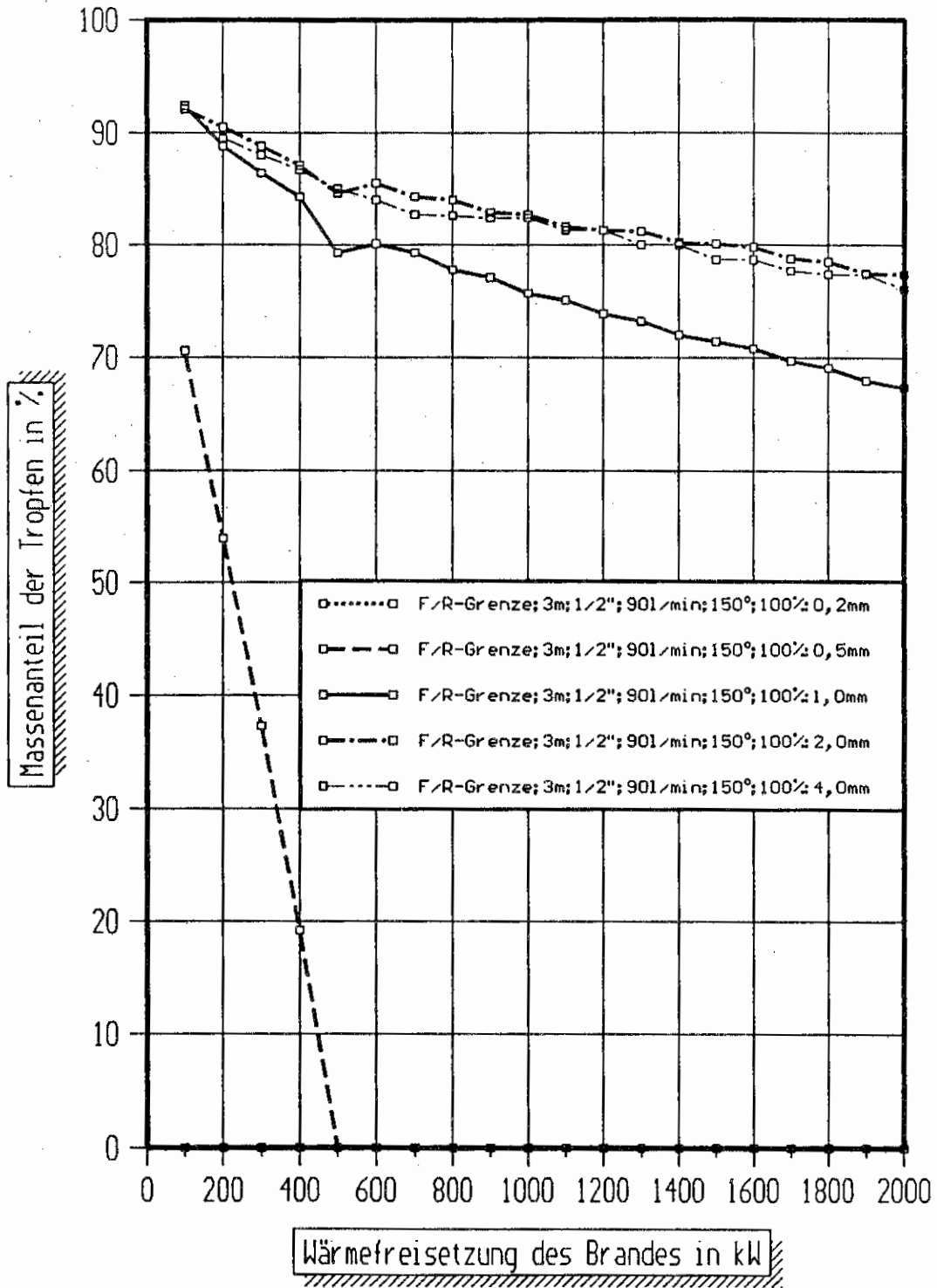


Bild 11.2 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die die F/R-Grenze überschreiten für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 3 m einem Volumenstrom von 90 l/min.

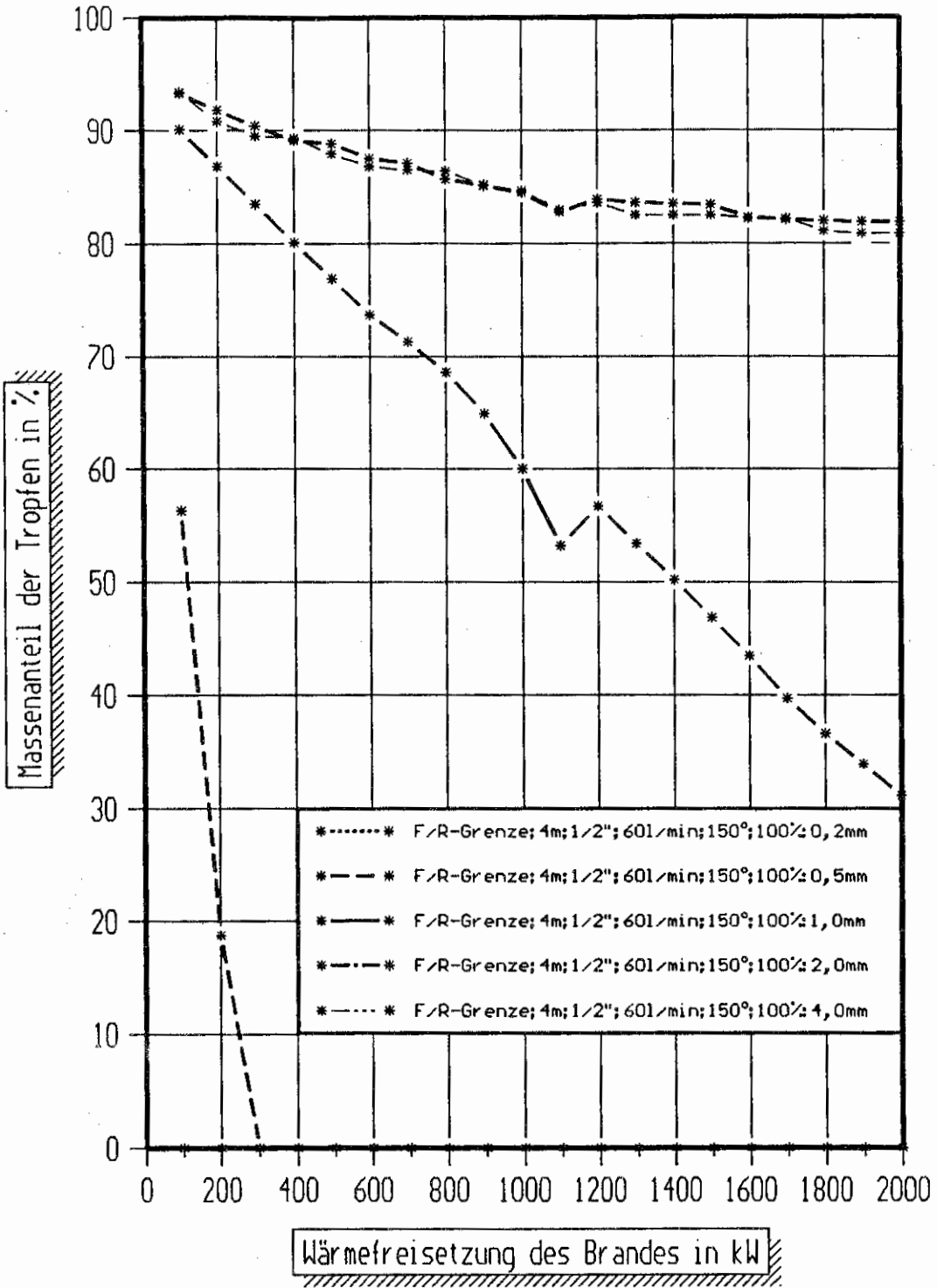


Bild 11.3 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die die F/R-Grenze überschreiten für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

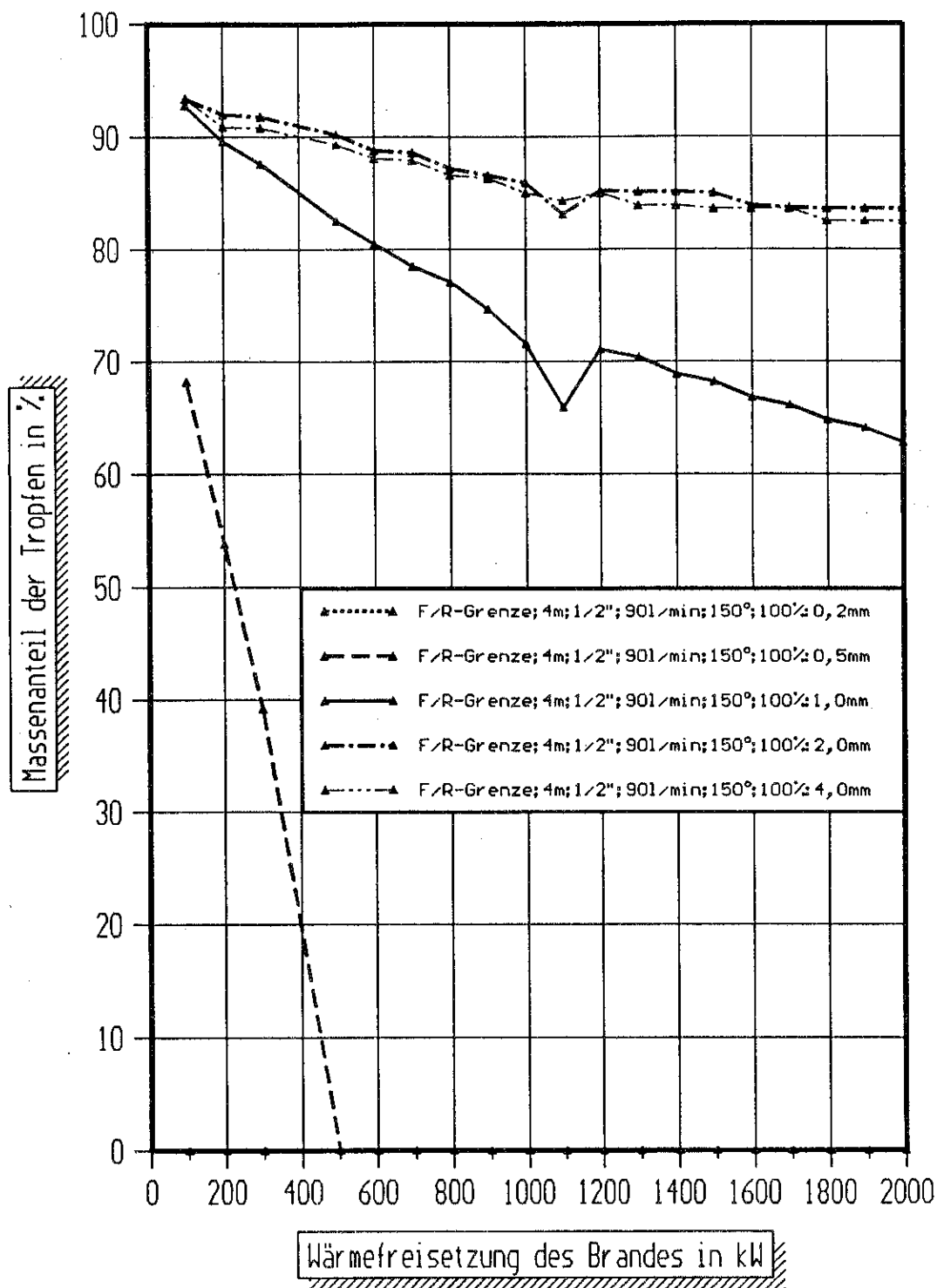


Bild 11.4 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die die F/R-Grenze überschreiten für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

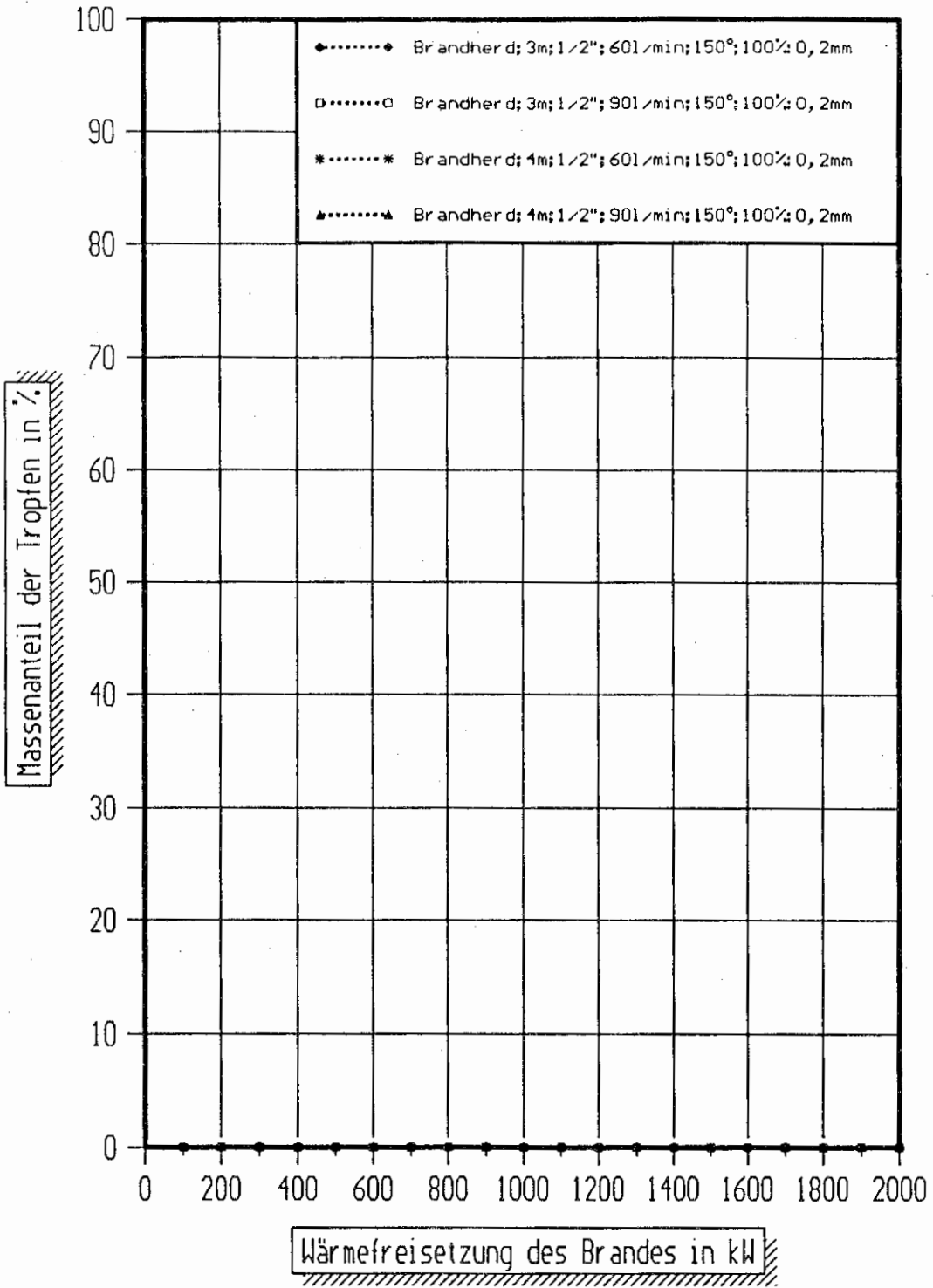


Bild 12.1 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die den **Brandherd** erreichen bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den **Tropfendurchmesser 0,2 mm**.

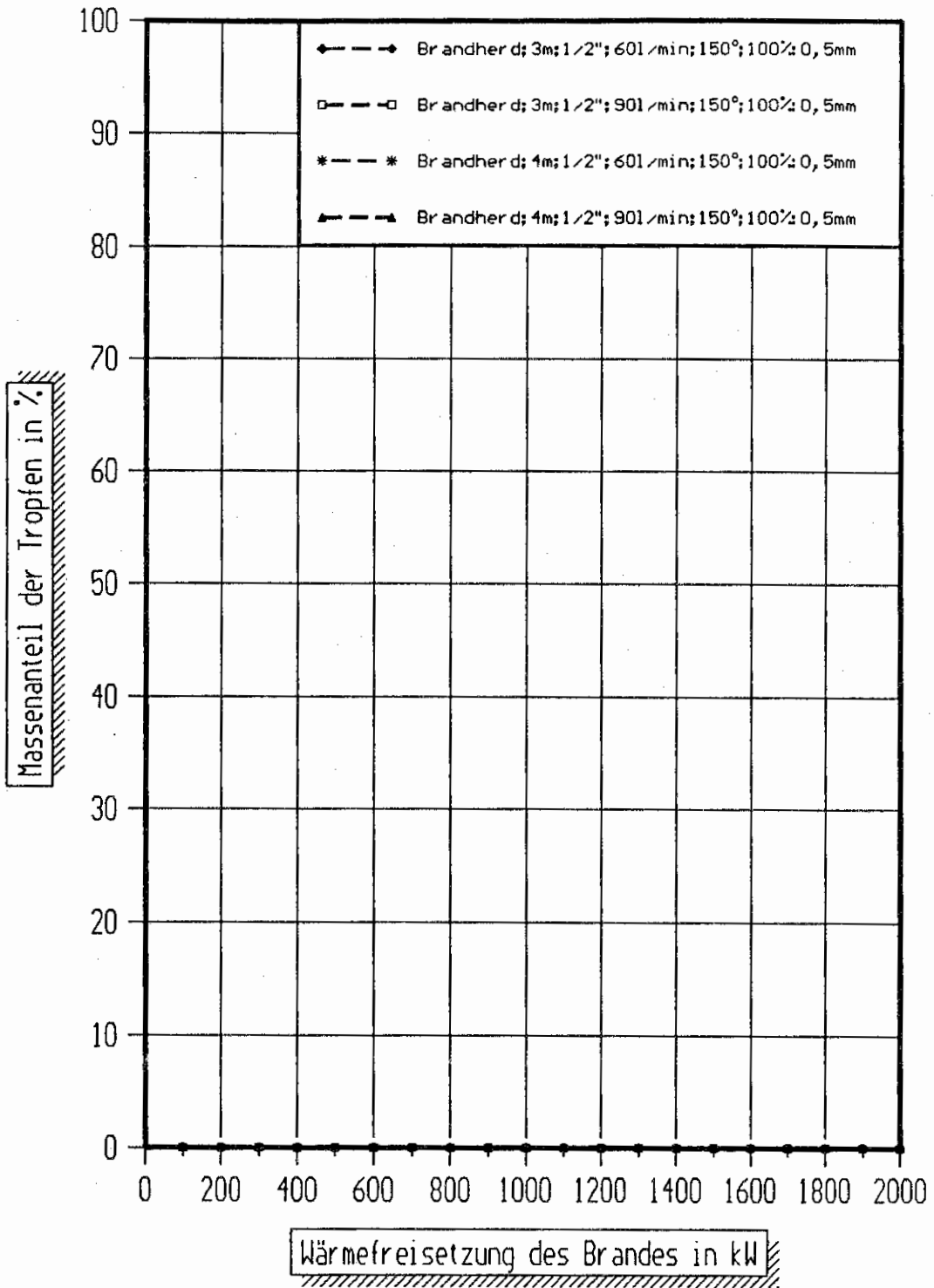


Bild 12.2 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die den **Brandherd** erreichen bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den **Tropfendurchmesser 0,5 mm**.

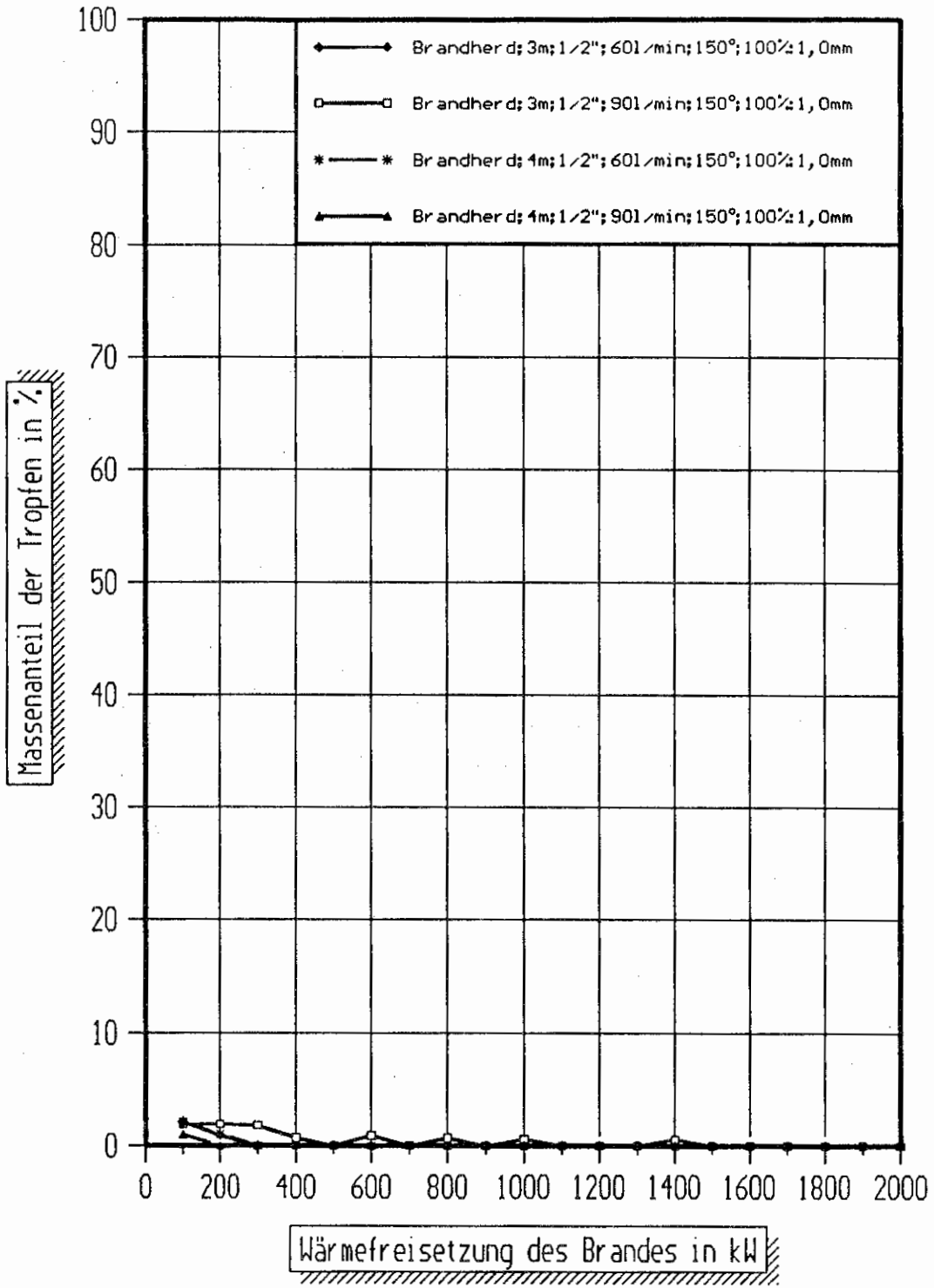


Bild 12.3 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die den Brandherd erreichen bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 1,0 mm.

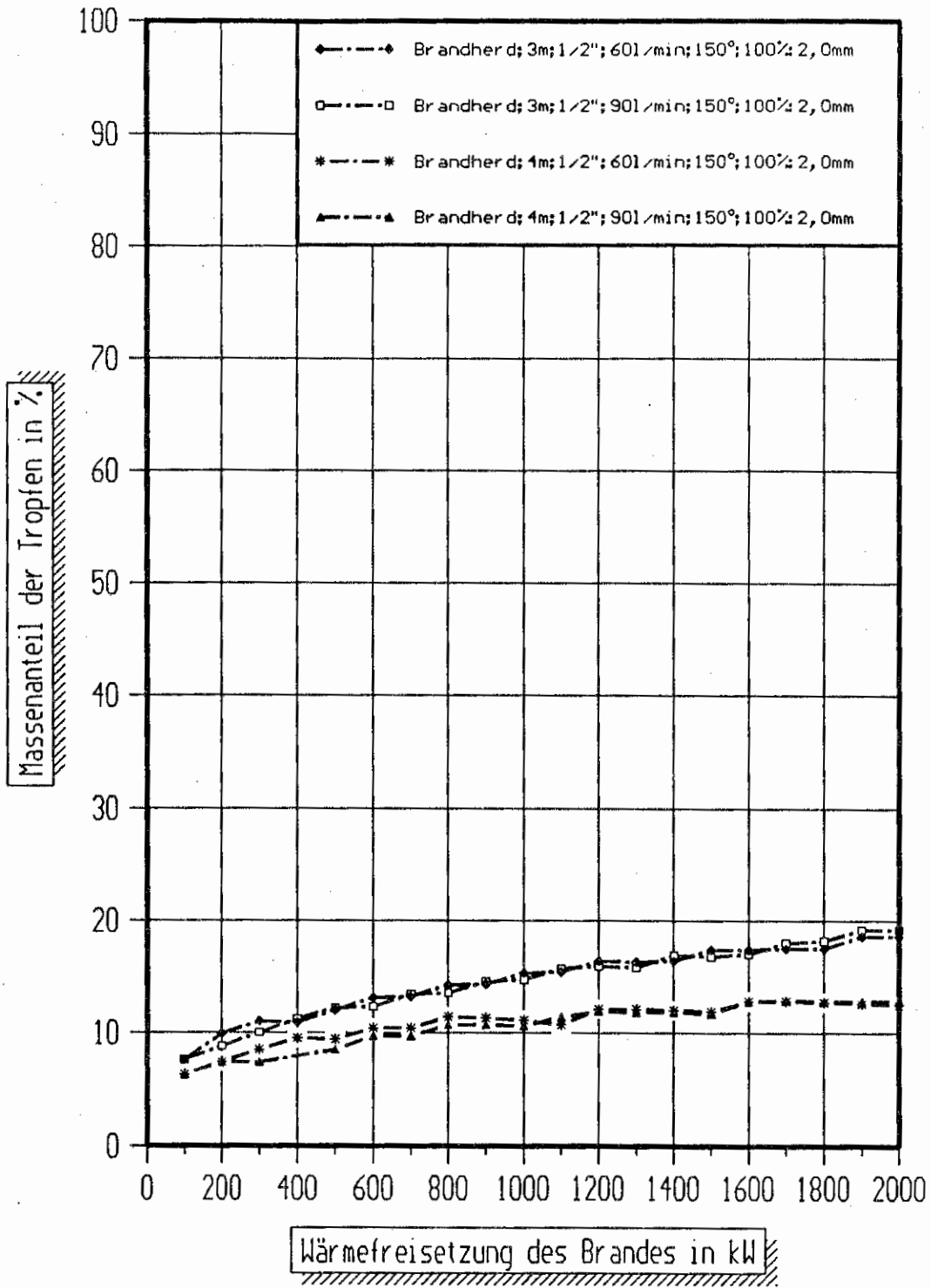


Bild 12.4 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die den **Brandherd** erreichen bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 2,0 mm.

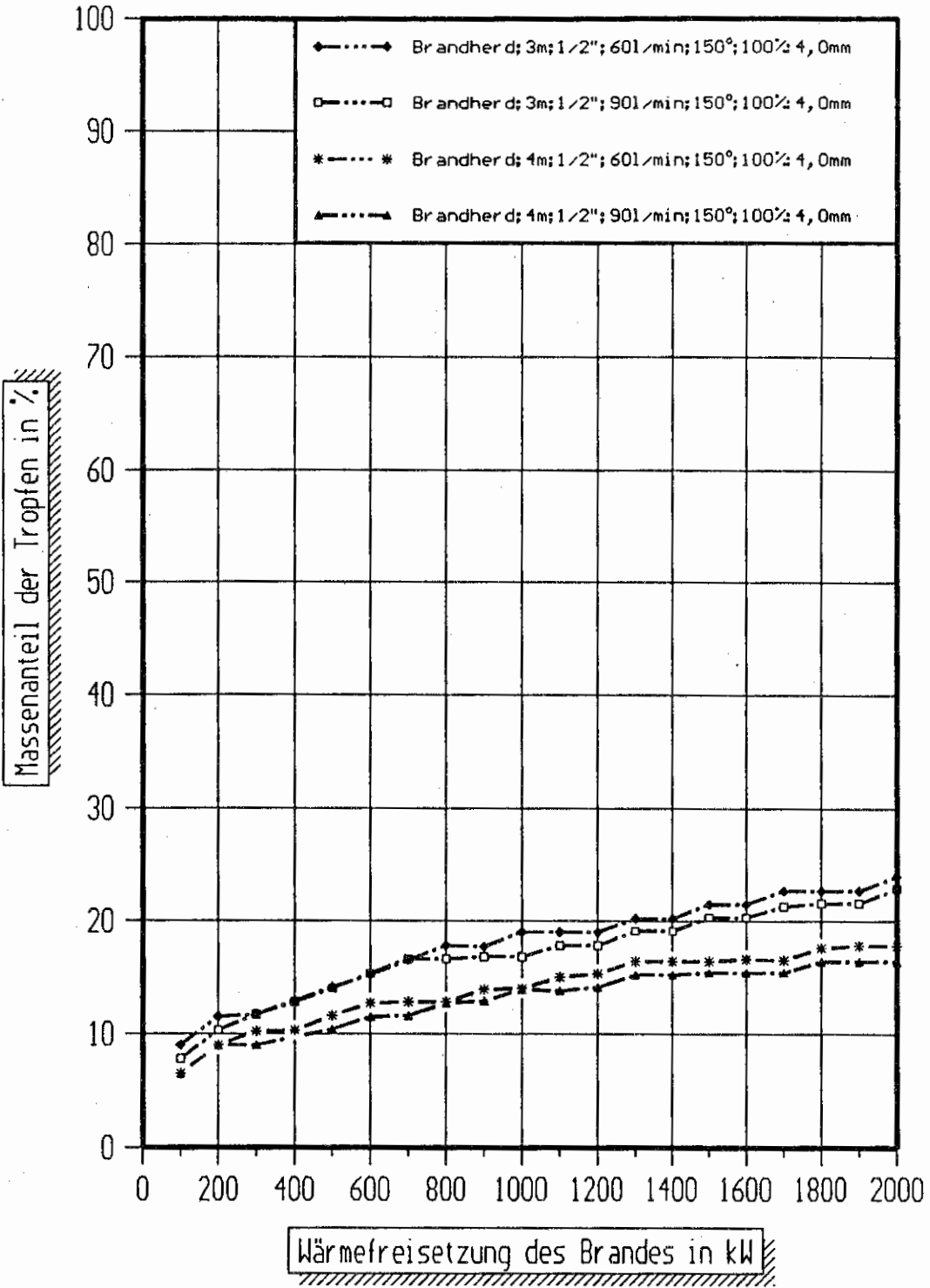


Bild 12.5 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die den Brandherd erreichen bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 4,0 mm.

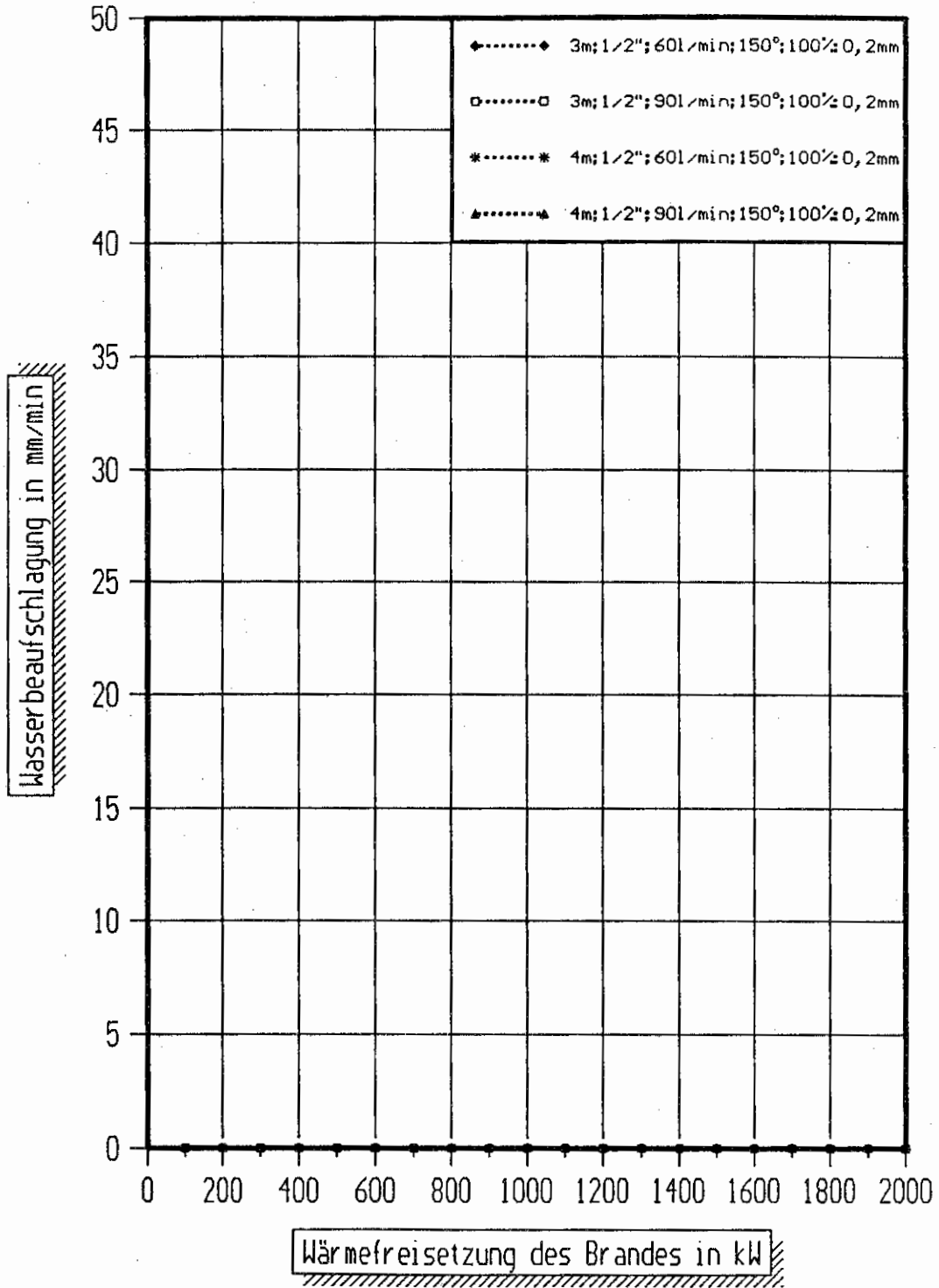


Bild 13.1 Vergleich der Wasserbeaufschlagungen am Brandherd bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 0,2 mm.

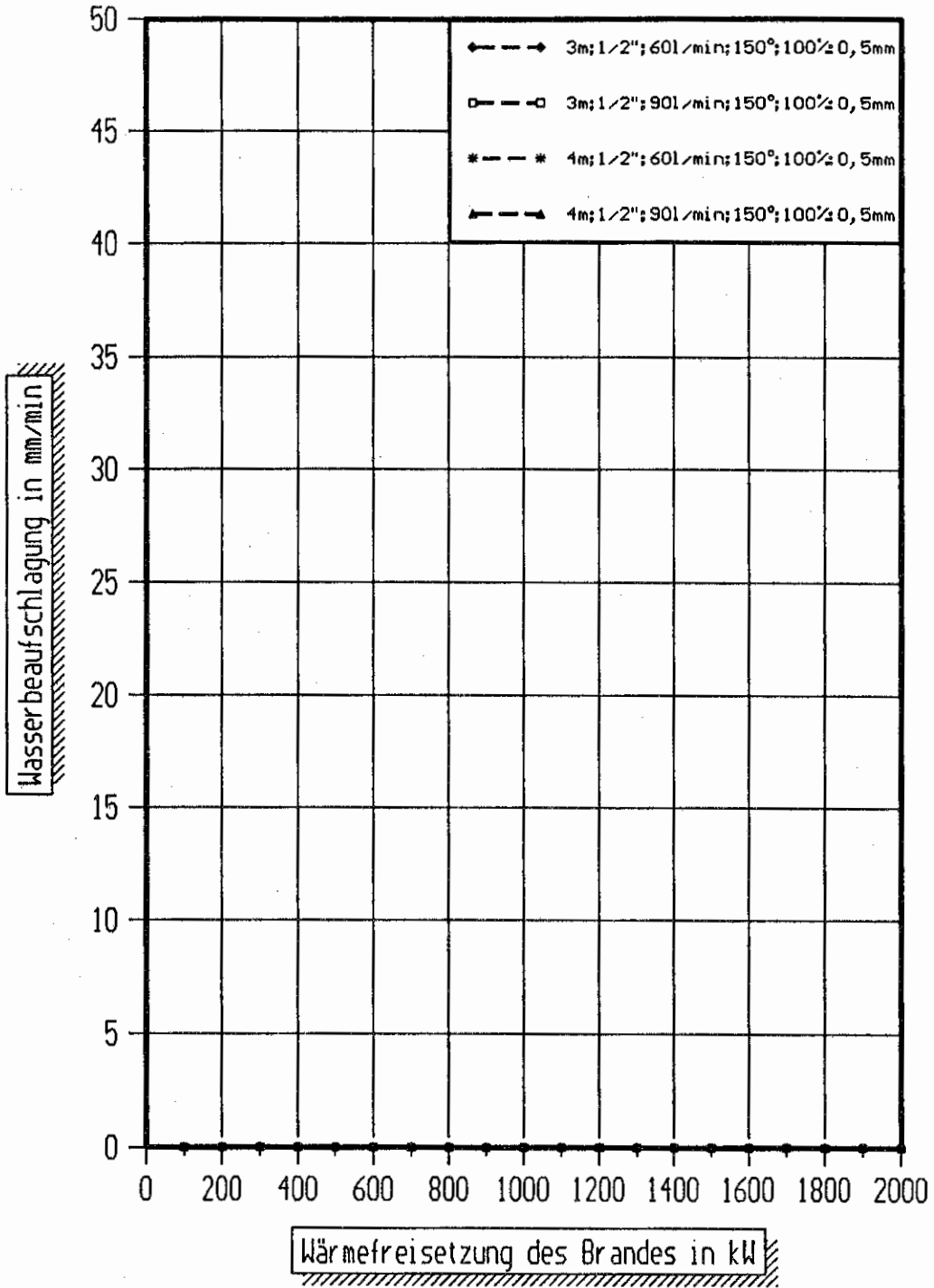


Bild 13.2 Vergleich der Wasserbeaufschlagungen am Brandherd bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 0,5 mm.

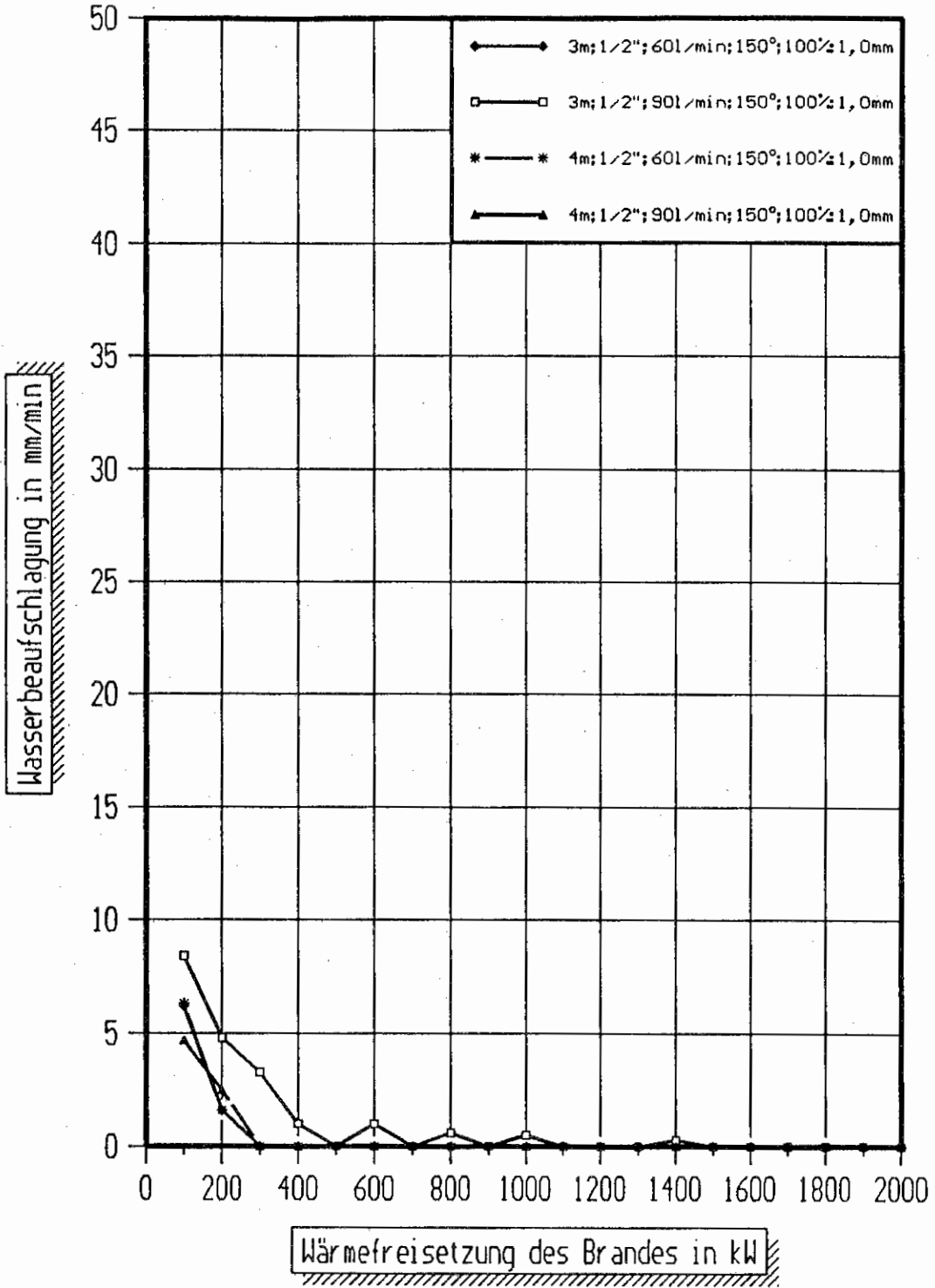


Bild 13.3 Vergleich der Wasserbeaufschlagungen am Brandherd bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 1,0 mm.

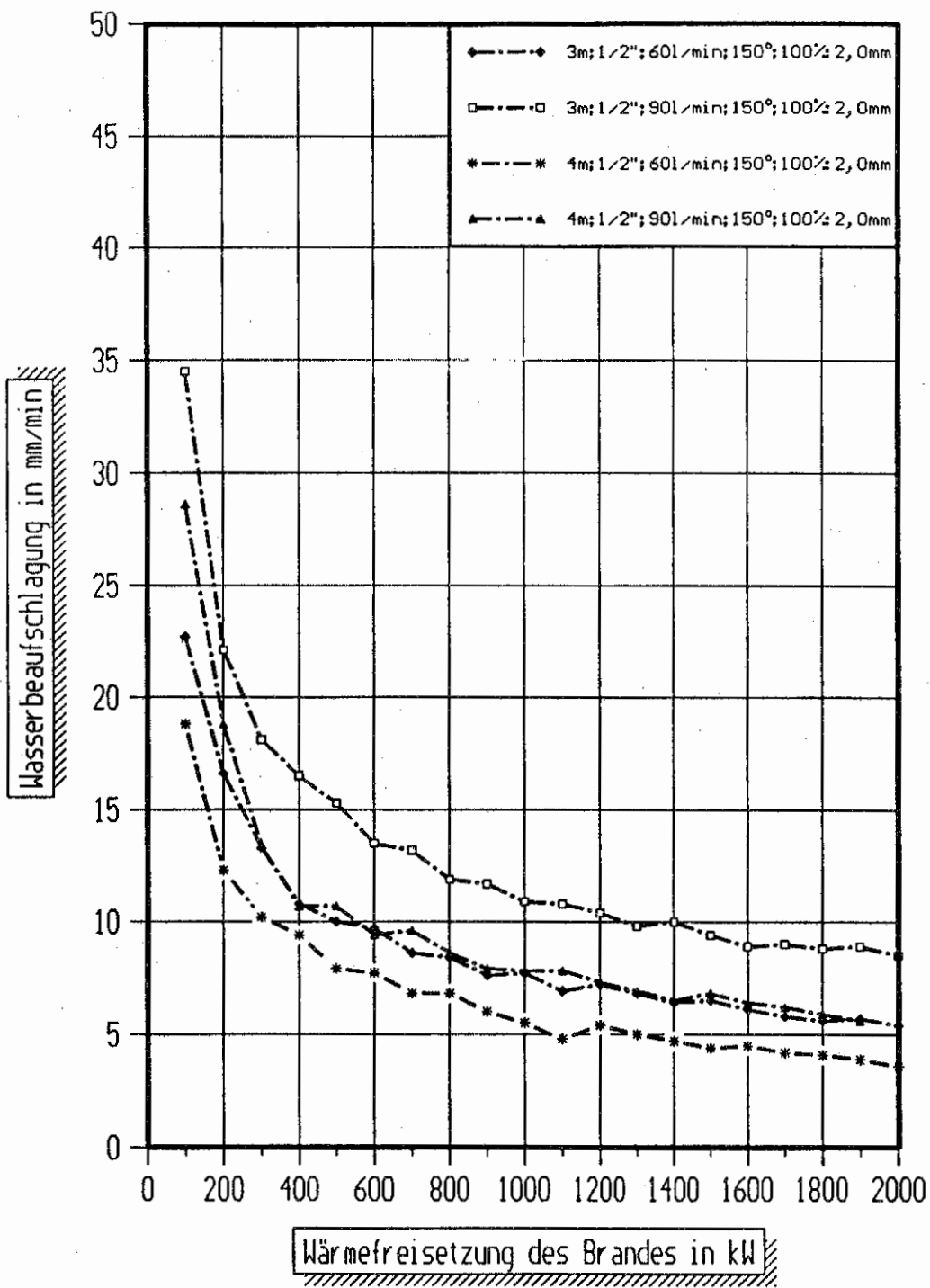


Bild 13.4 Vergleich der Wasserbeaufschlagungen am Brandherd bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 2,0 mm.

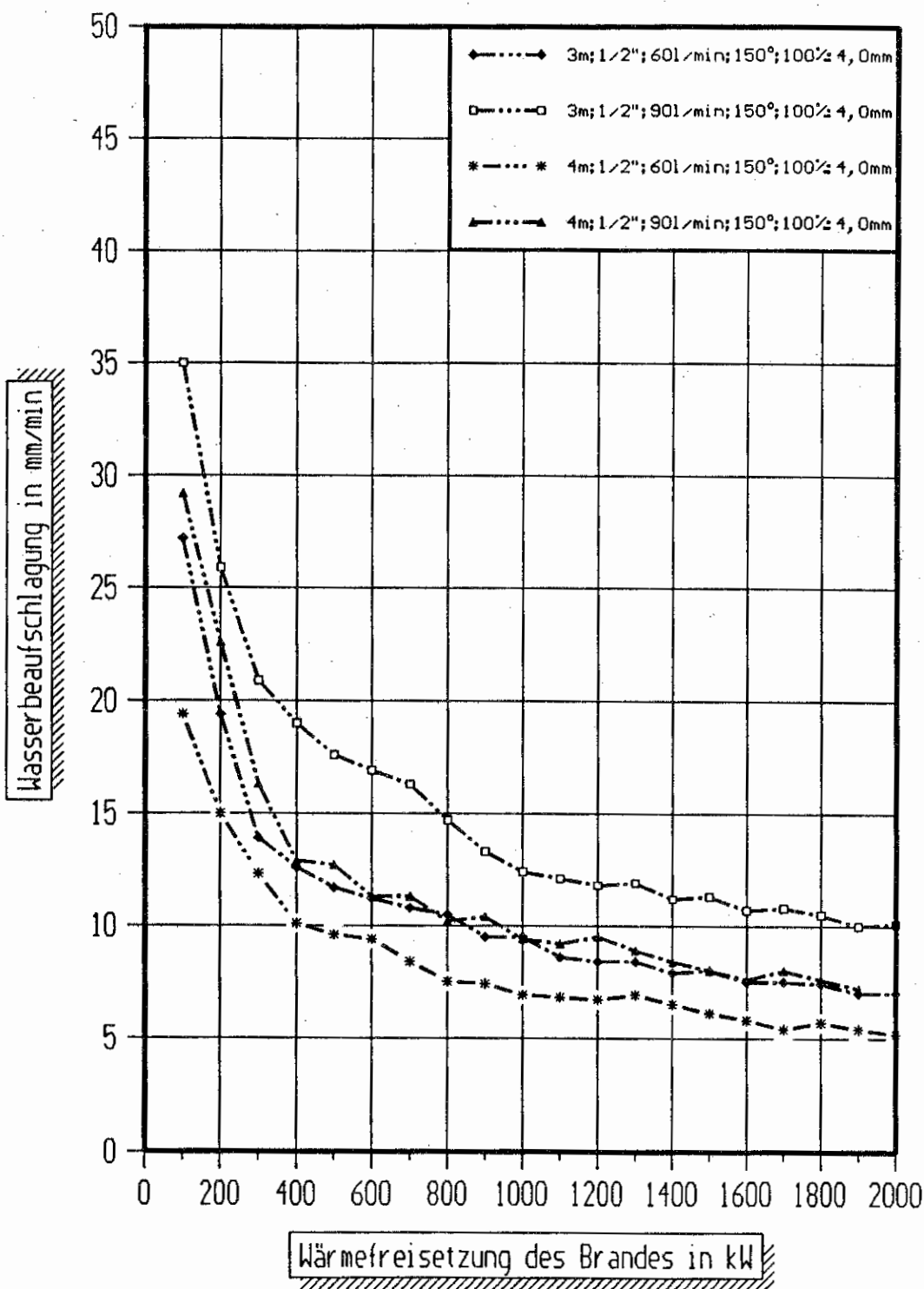


Bild 13.5 Vergleich der Wasserbeaufschlagungen am Brandherd bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 4,0 mm.

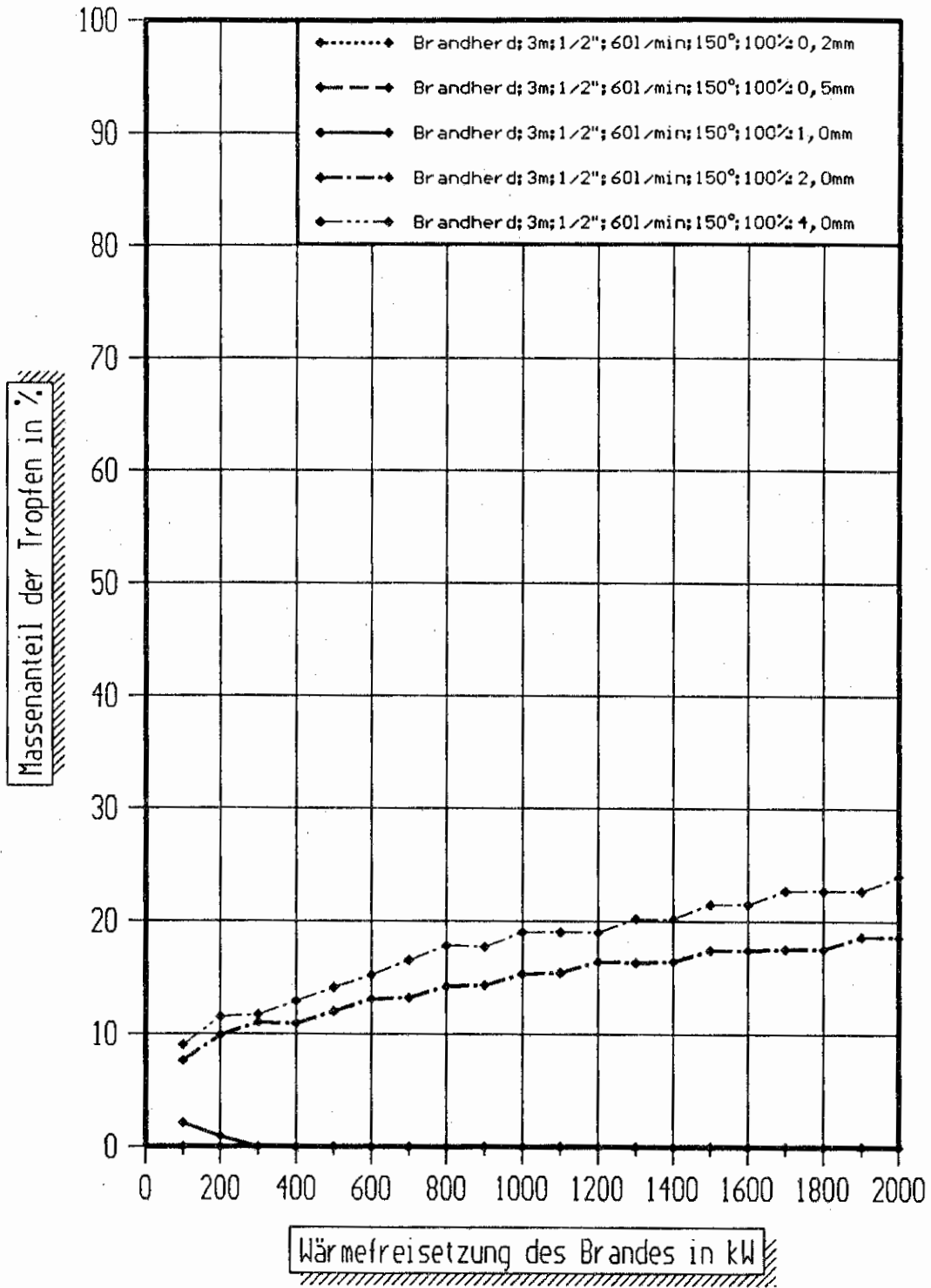


Bild 14.1 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die den Brandherd erreichen für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

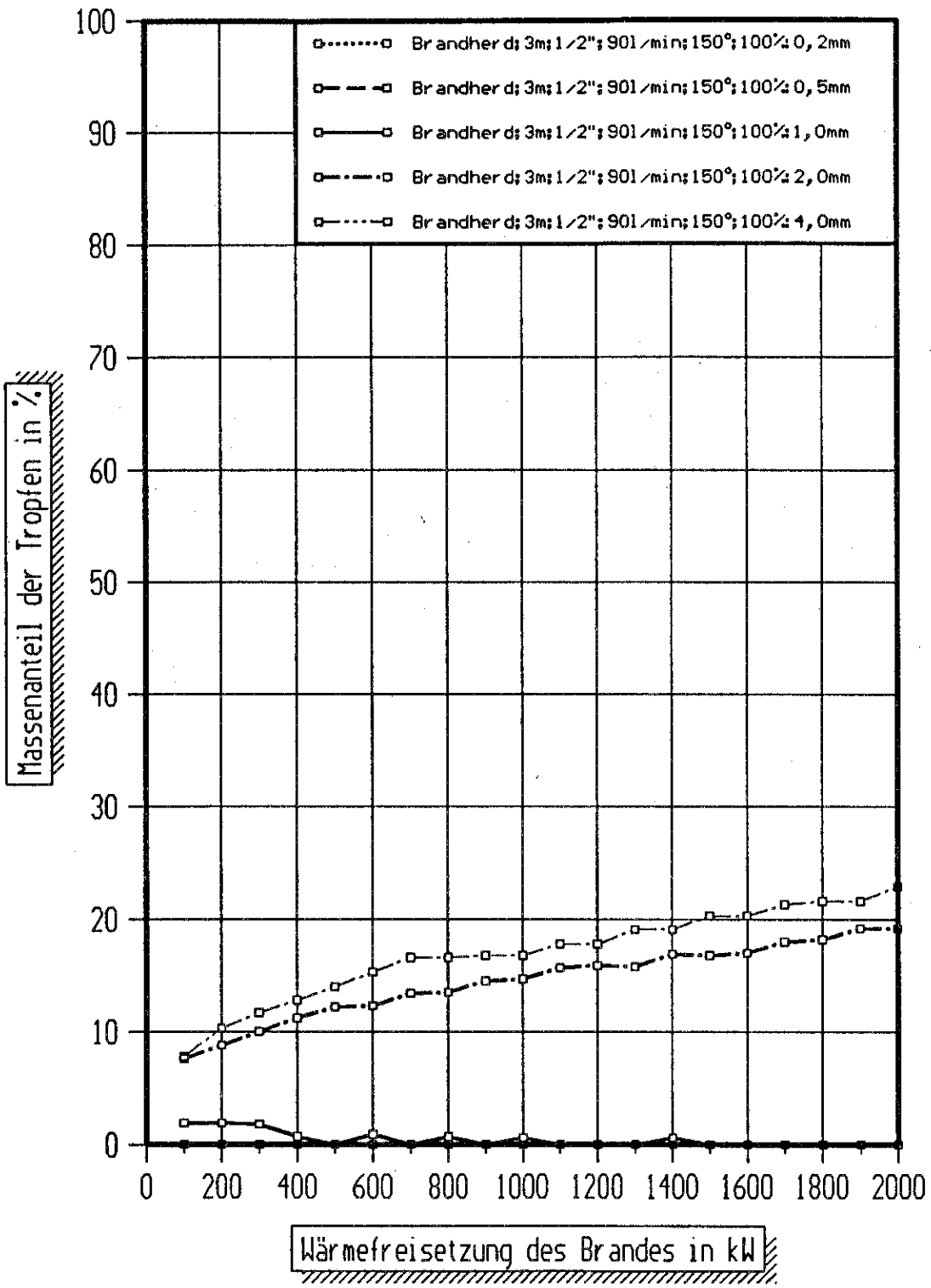


Bild 14.2 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die den Brandherd erreichen für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

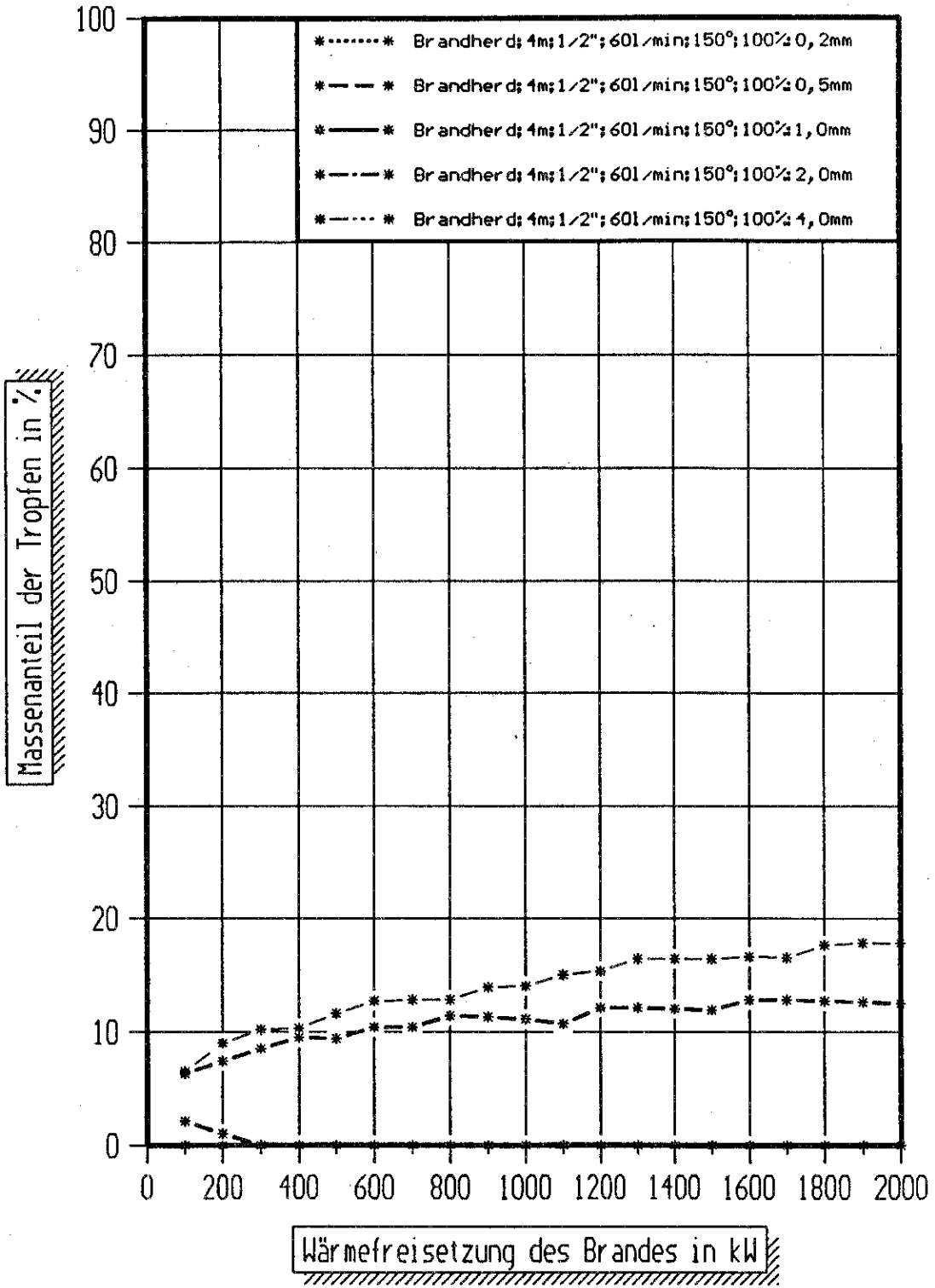


Bild 14.3 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die den Brandherd erreichen für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

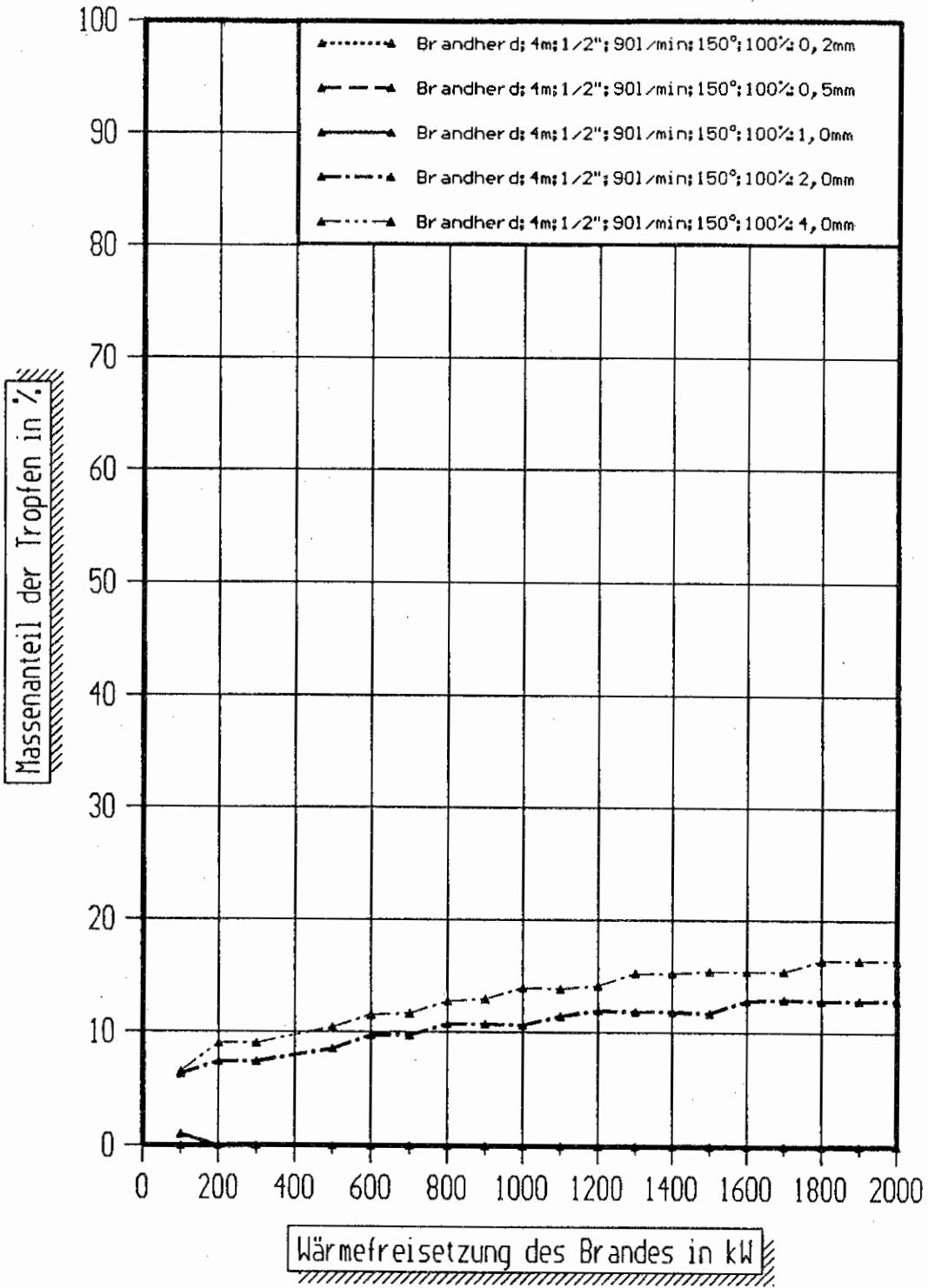


Bild 14.4 Vergleich der Massenanteile der Tropfen, die den Brandherd erreichen für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

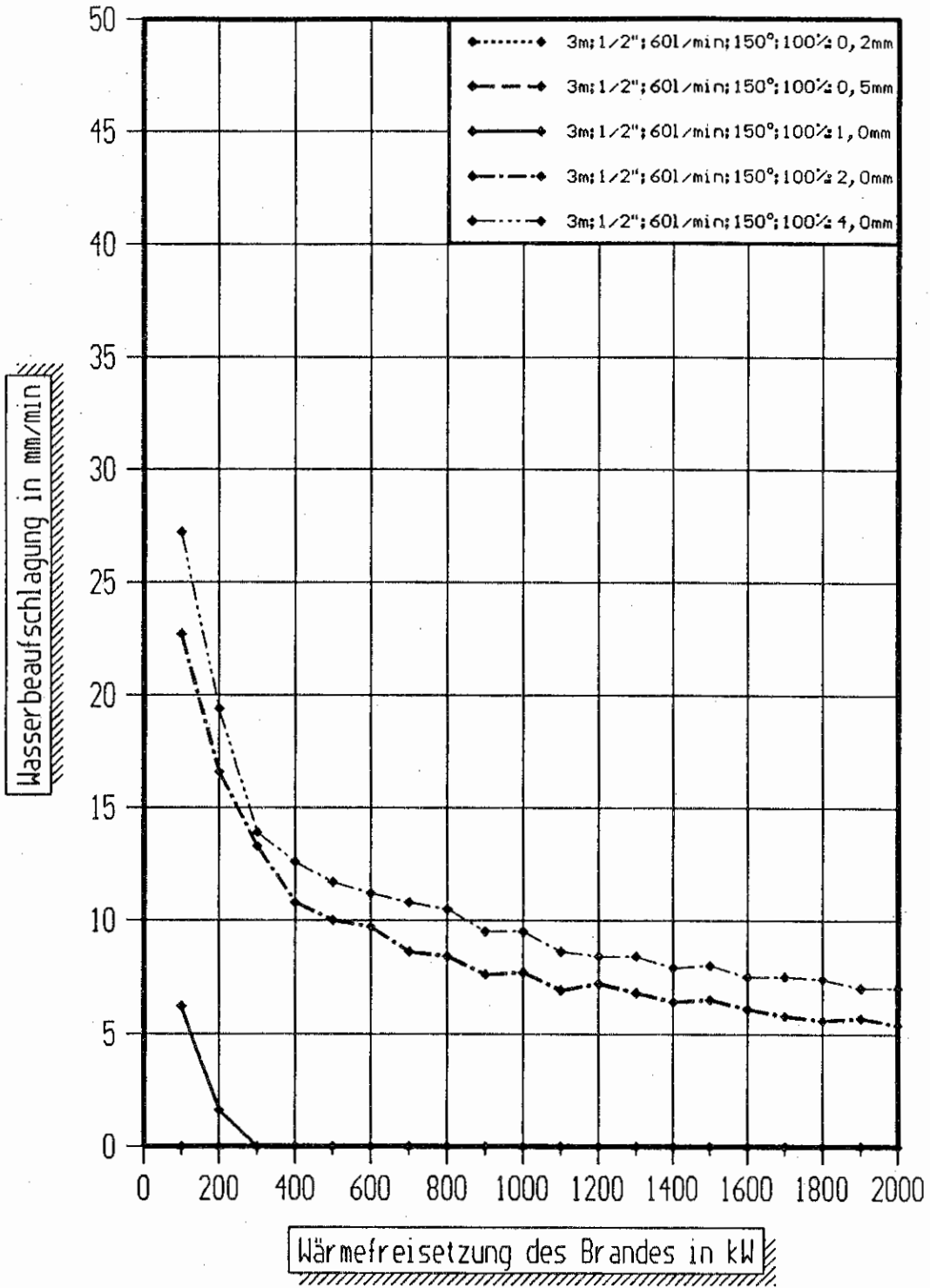


Bild 15.1 Vergleich der Wasserbeaufschlagungen am Brandherd für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

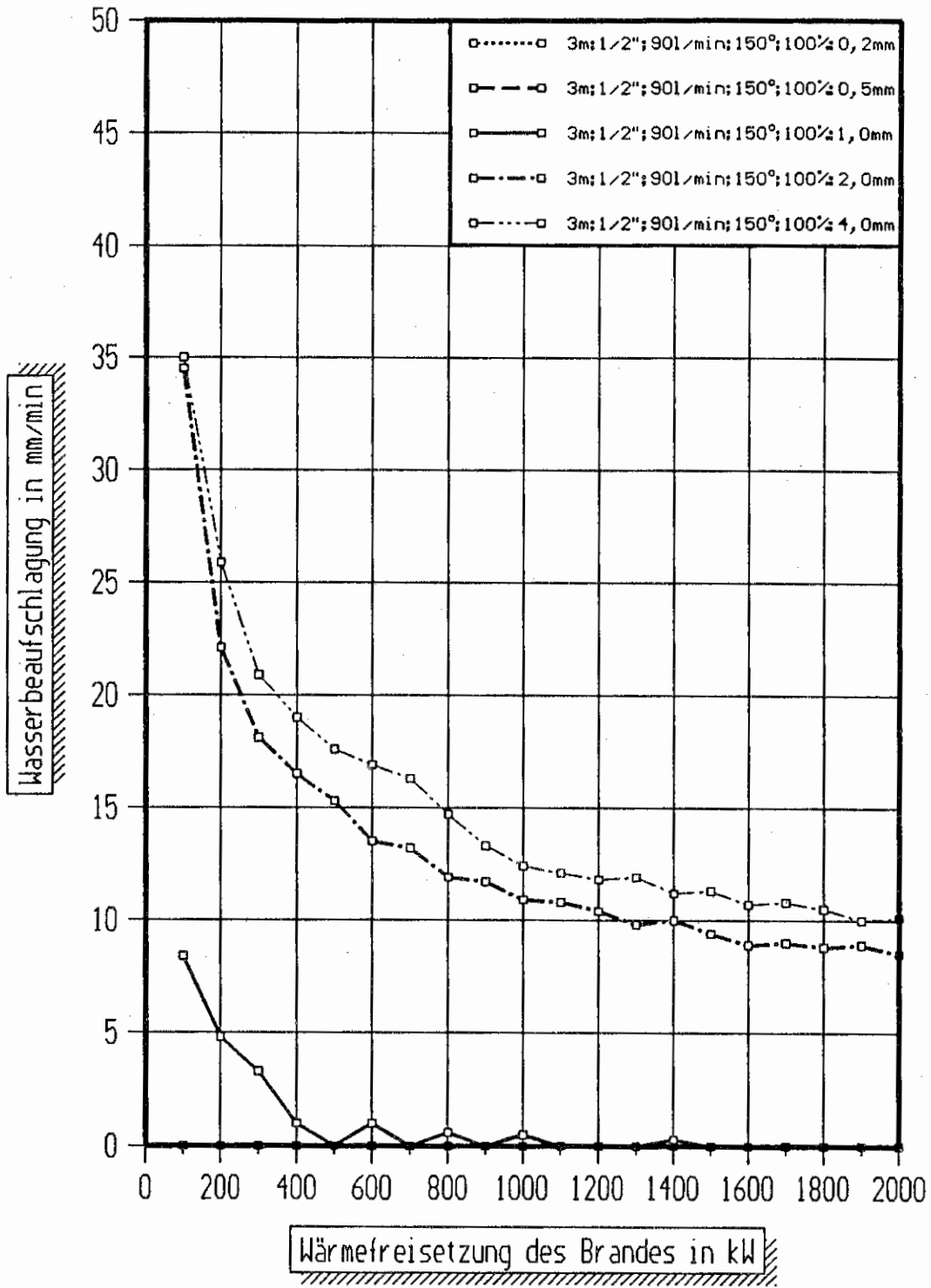


Bild 15.2 Vergleich der **Wasserbeaufschlagungen** am Brandherd für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

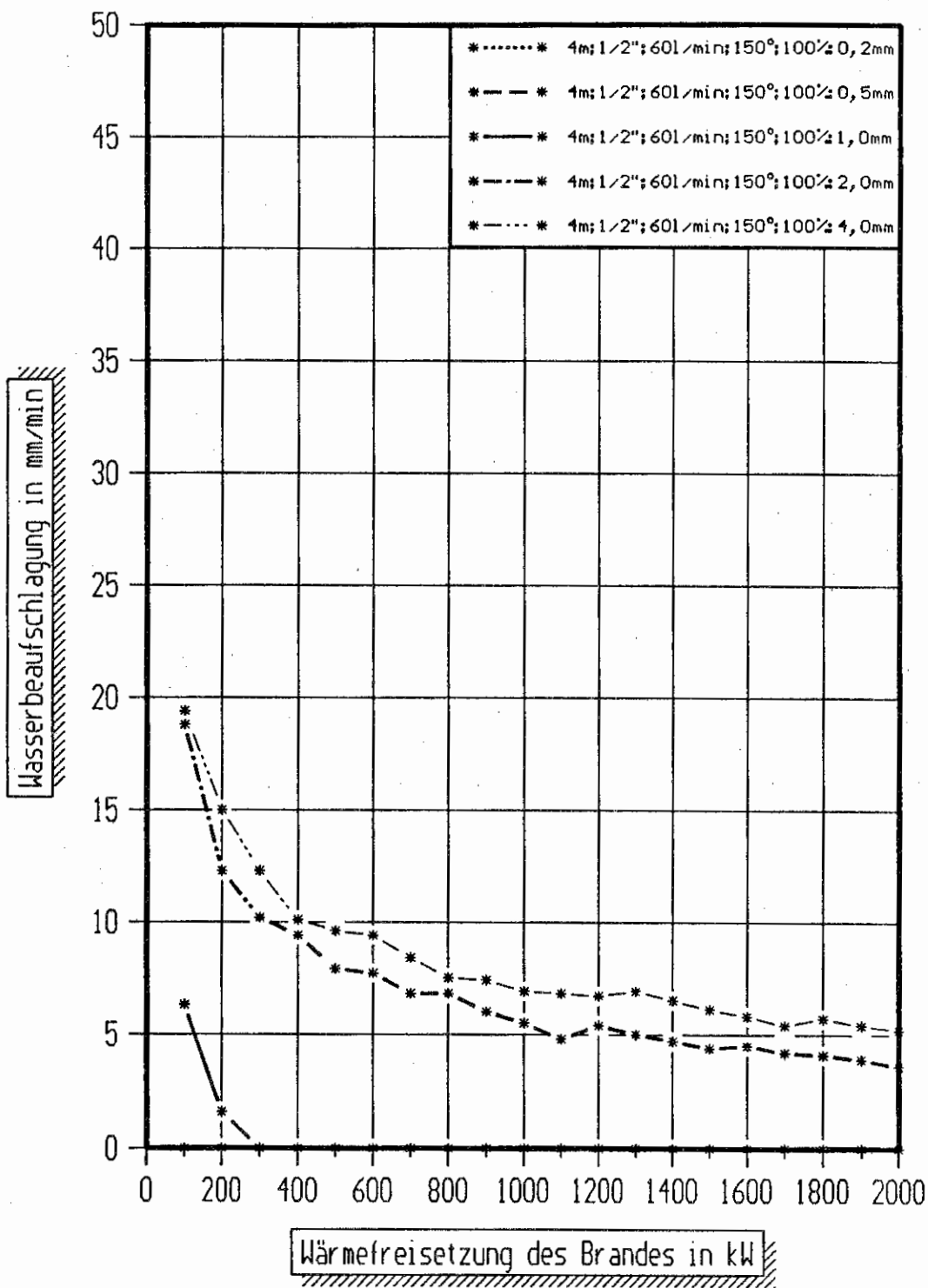


Bild 15.3 Vergleich der Wasserbeaufschlagungen am Brandherd für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

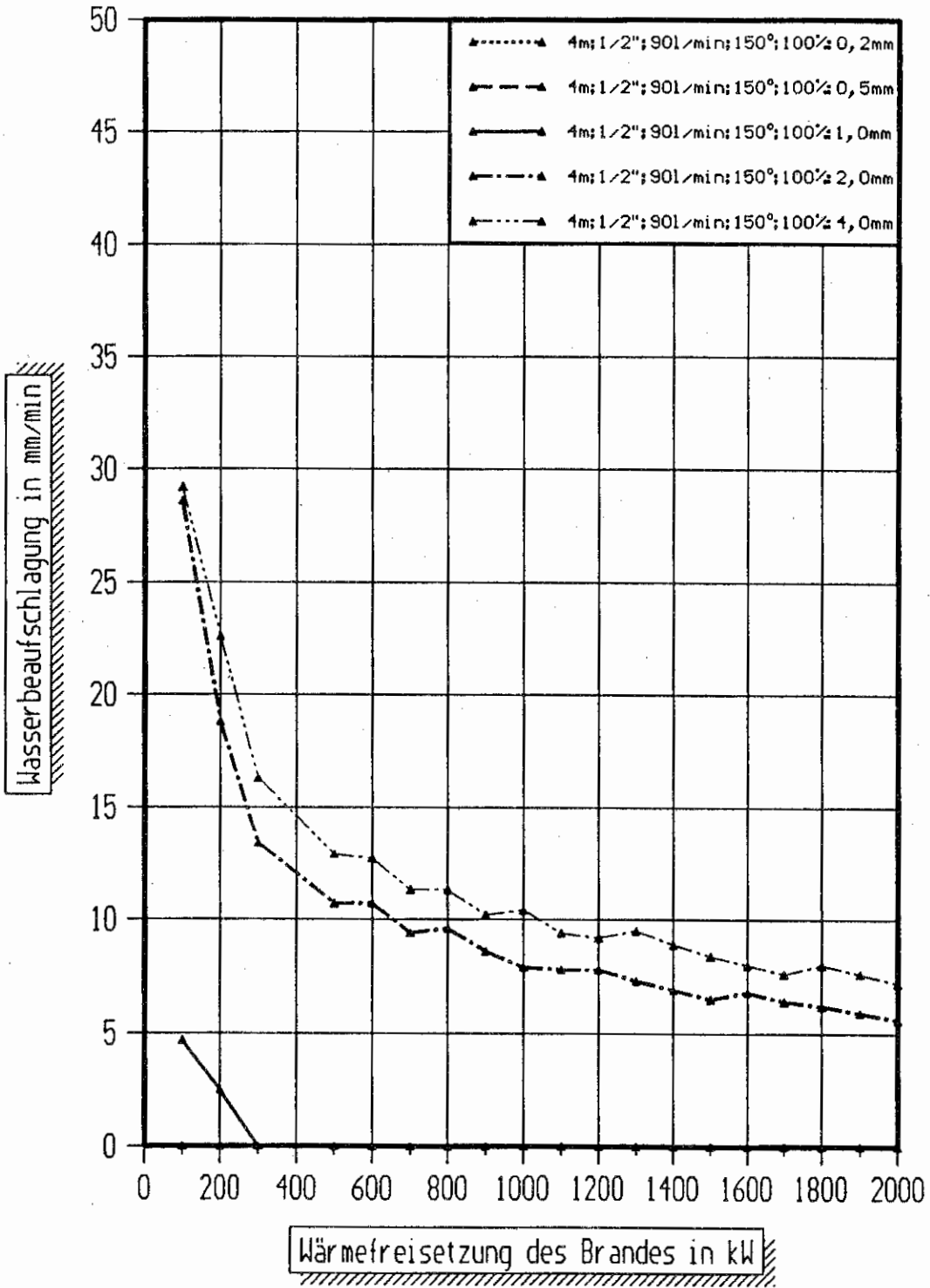


Bild 15.4 Vergleich der Wasserbeaufschlagungen am Brandherd für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

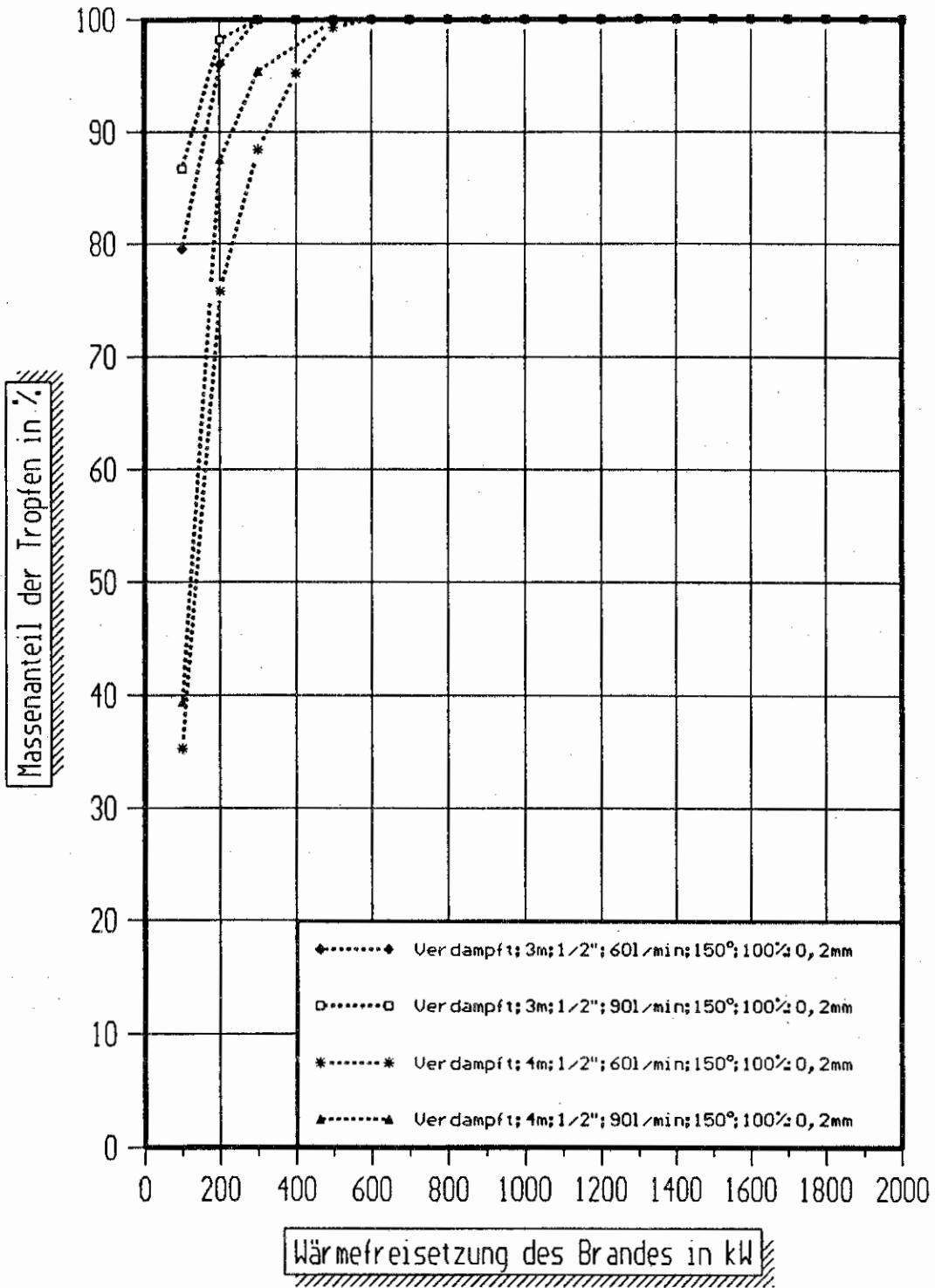


Bild 16.1 Vergleich der verdampften Tropfenmasse in Masseanteilen, bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 0,2 mm.

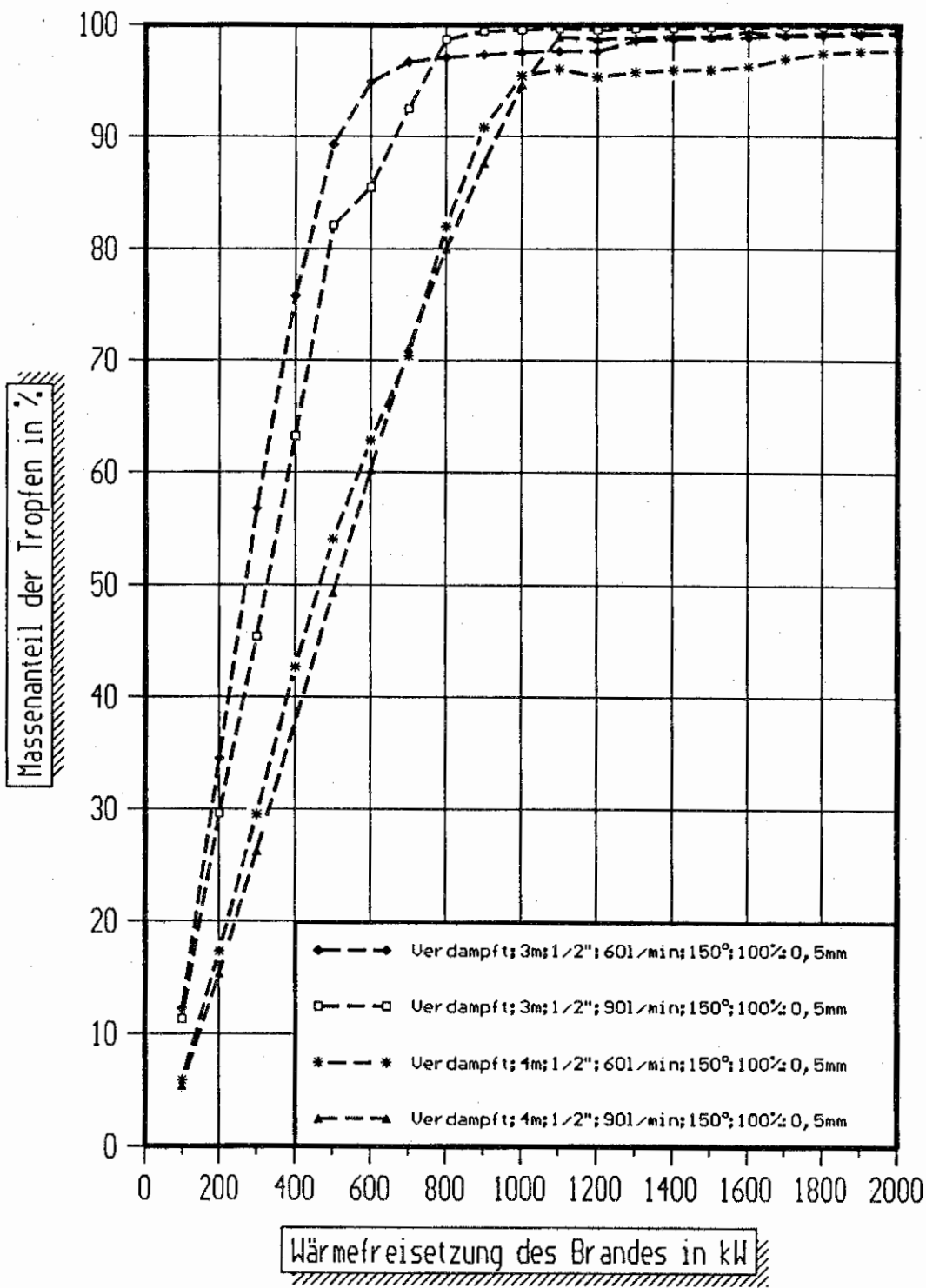


Bild 16.2 Vergleich der verdampften Tropfenmasse in Masseanteilen, bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 0,5 mm.

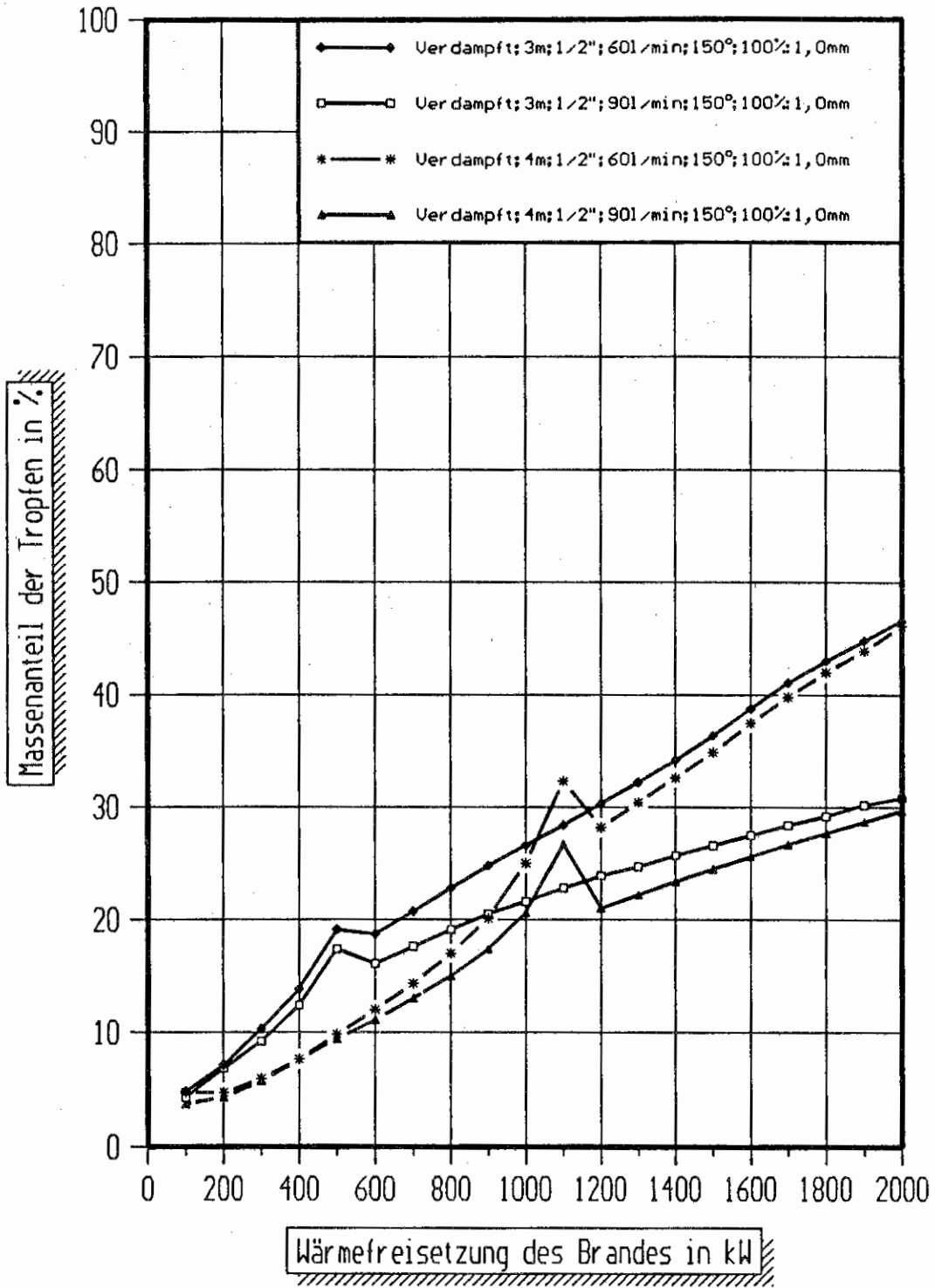


Bild 16.3 Vergleich der verdampften Tropfenmasse in Masseanteilen, bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 1,0 mm.

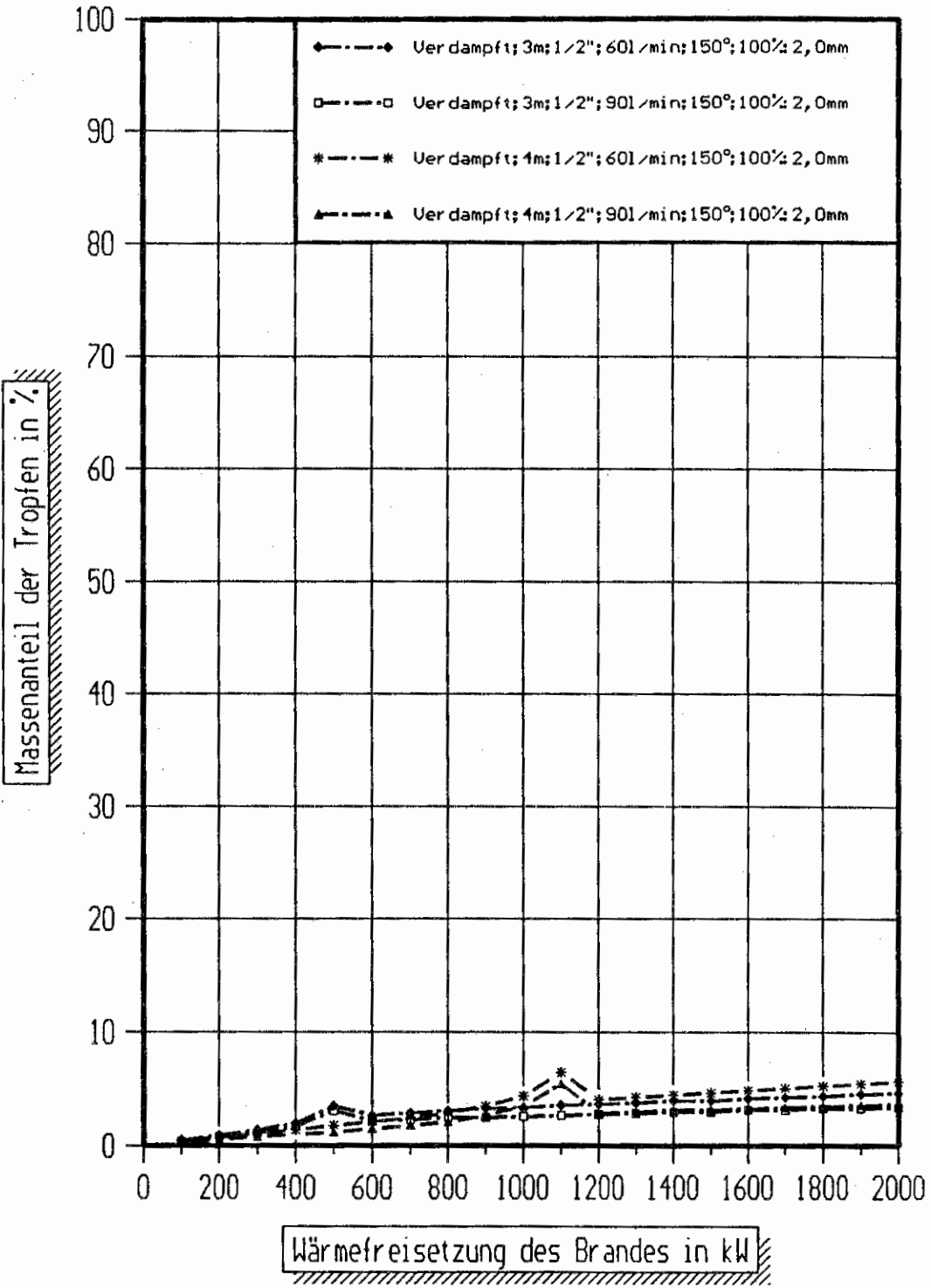


Bild 16.4 Vergleich der verdampften Tropfenmasse in Masseanteilen, bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 2,0 mm.

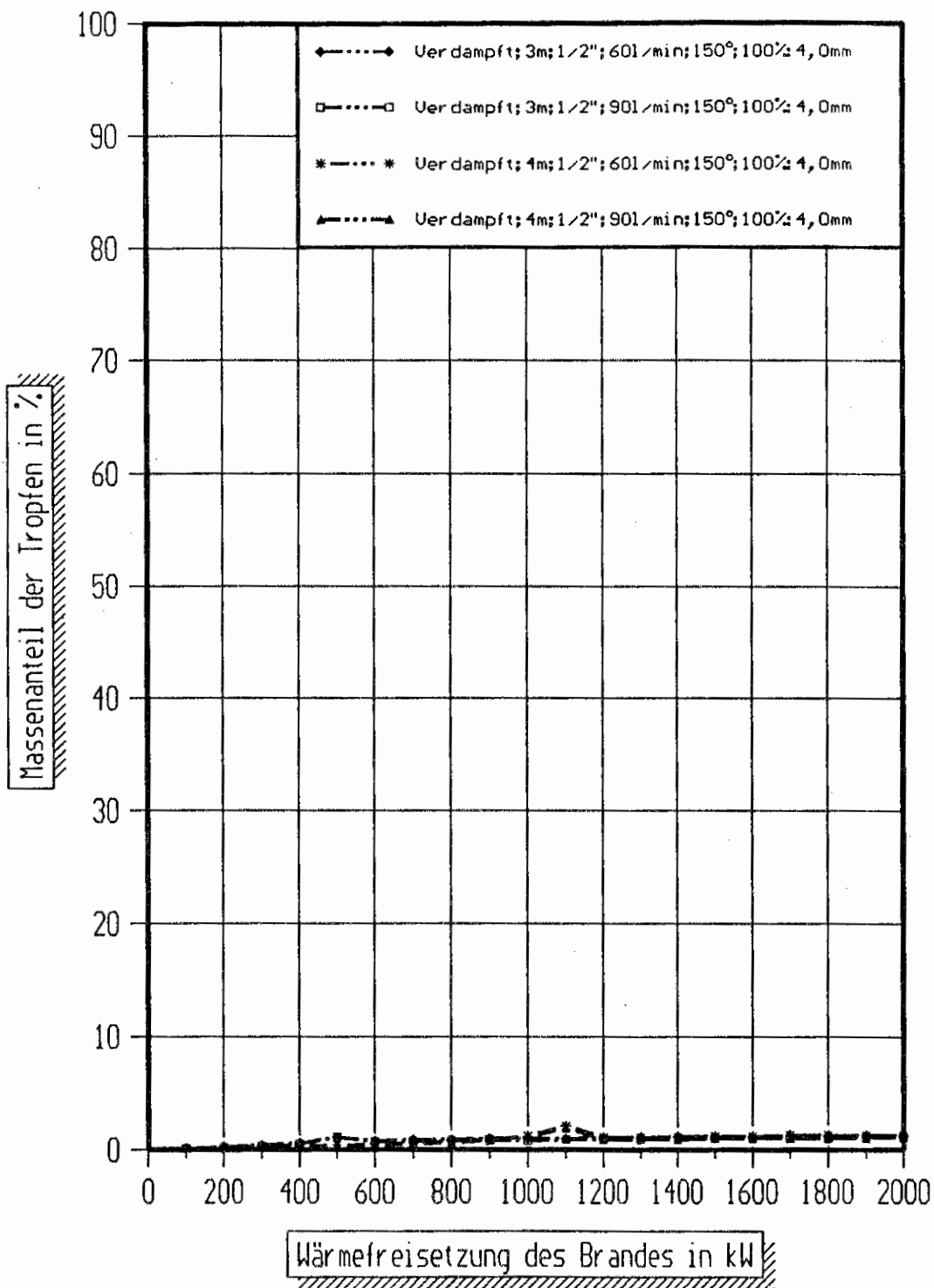


Bild 16.5 Vergleich der **verdampften Tropfenmasse** in Masseanteilen, bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den **Tropfendurchmesser 4,0 mm**.

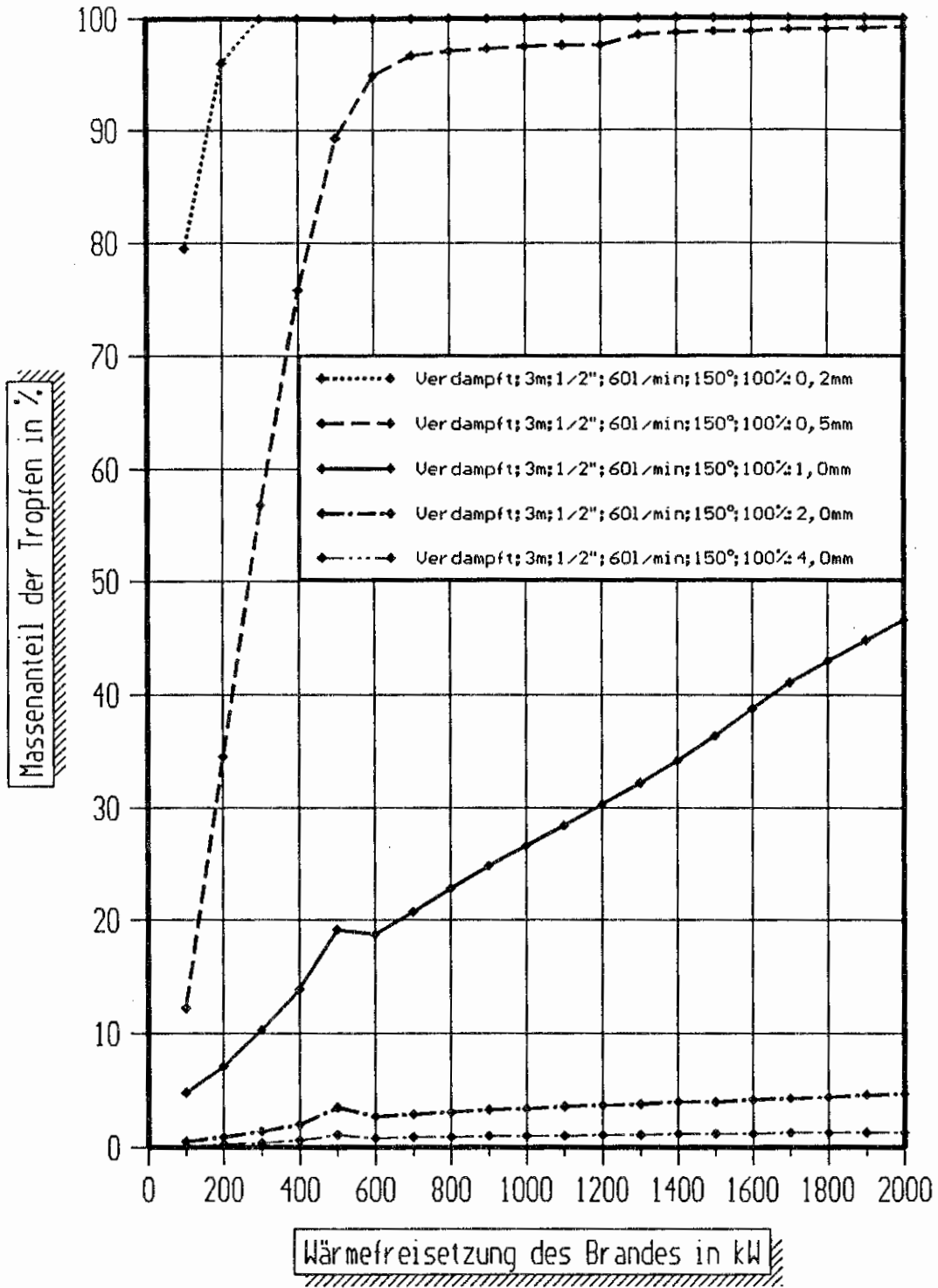


Bild 17.1 Vergleich der verdampften Tropfenmasse in Masseanteilen für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

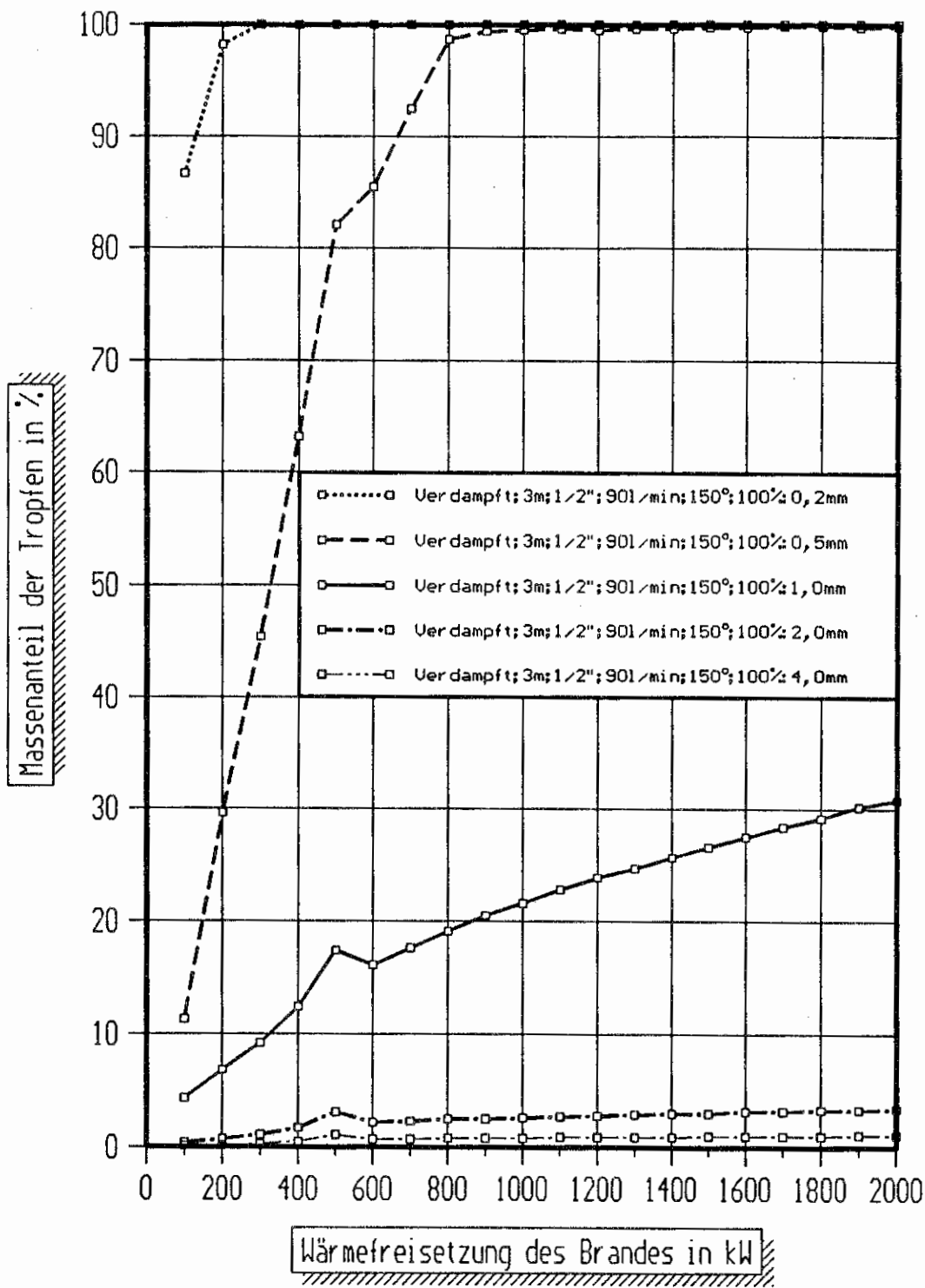


Bild 17.2 Vergleich der verdampften Tropfenmasse in Masseanteilen für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

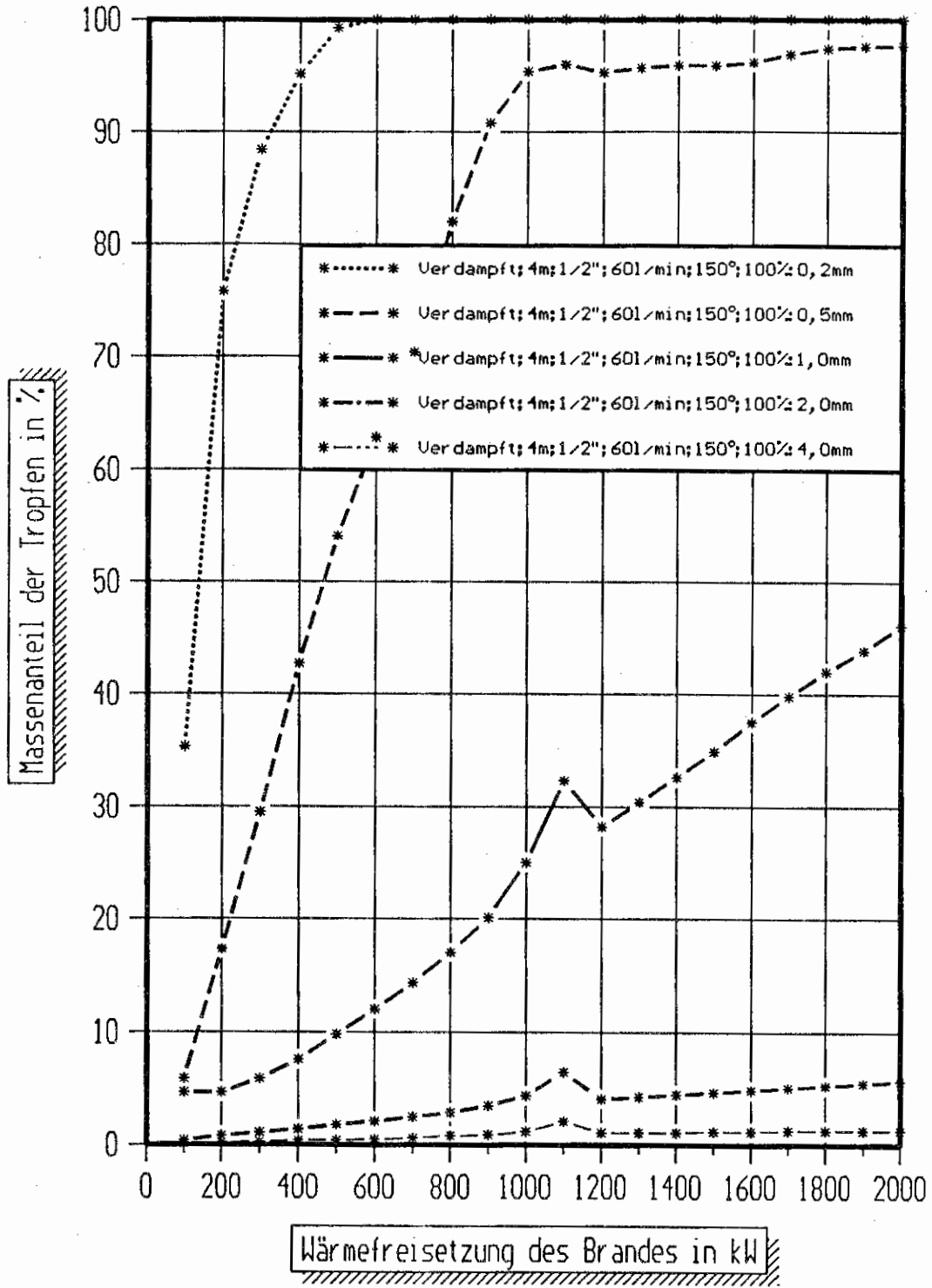


Bild 17.3 Vergleich der verdampften Tropfenmasse in Masseanteilen für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

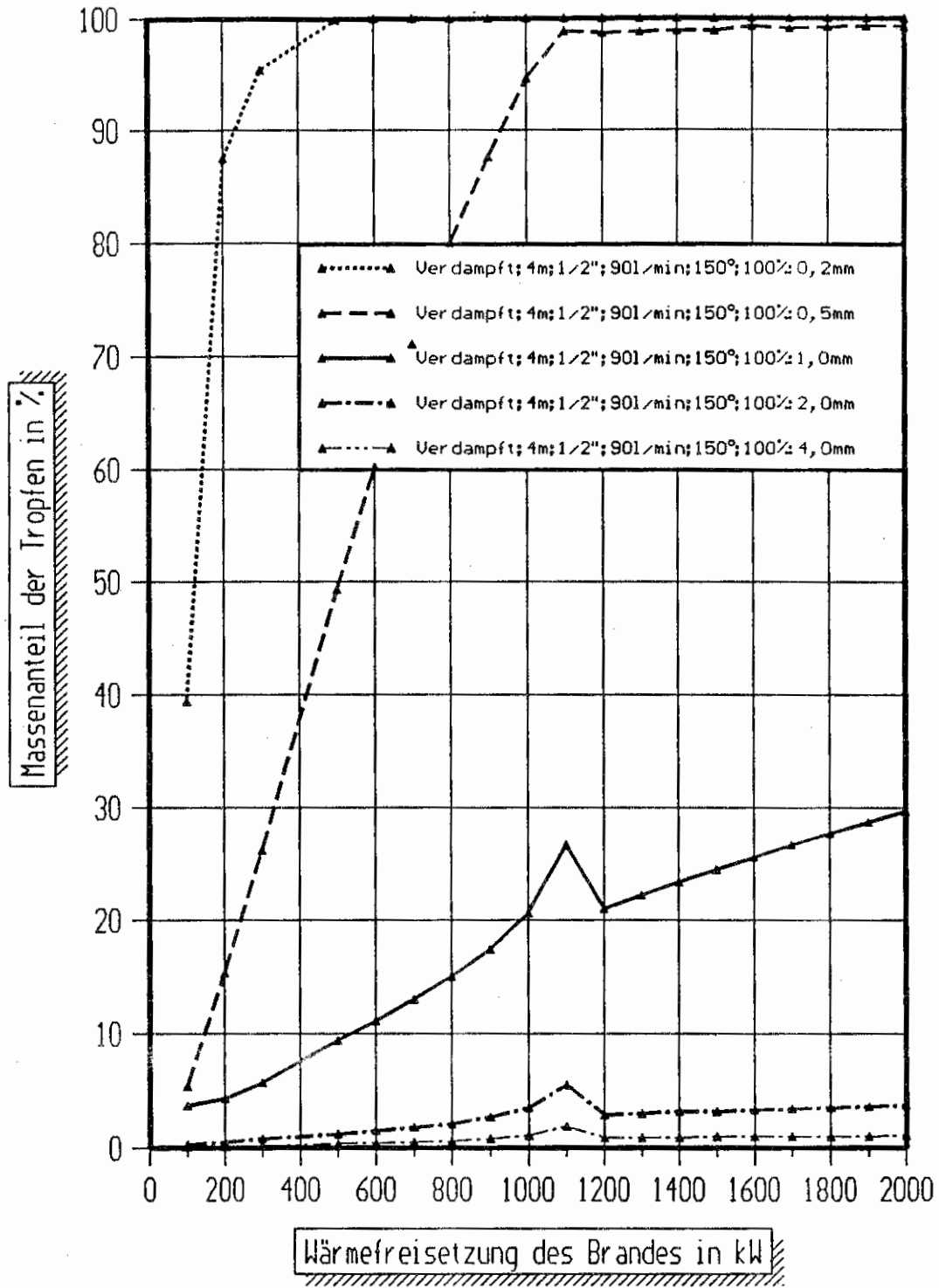


Bild 17.4 Vergleich der verdampften Tropfenmasse in Masseanteilen für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

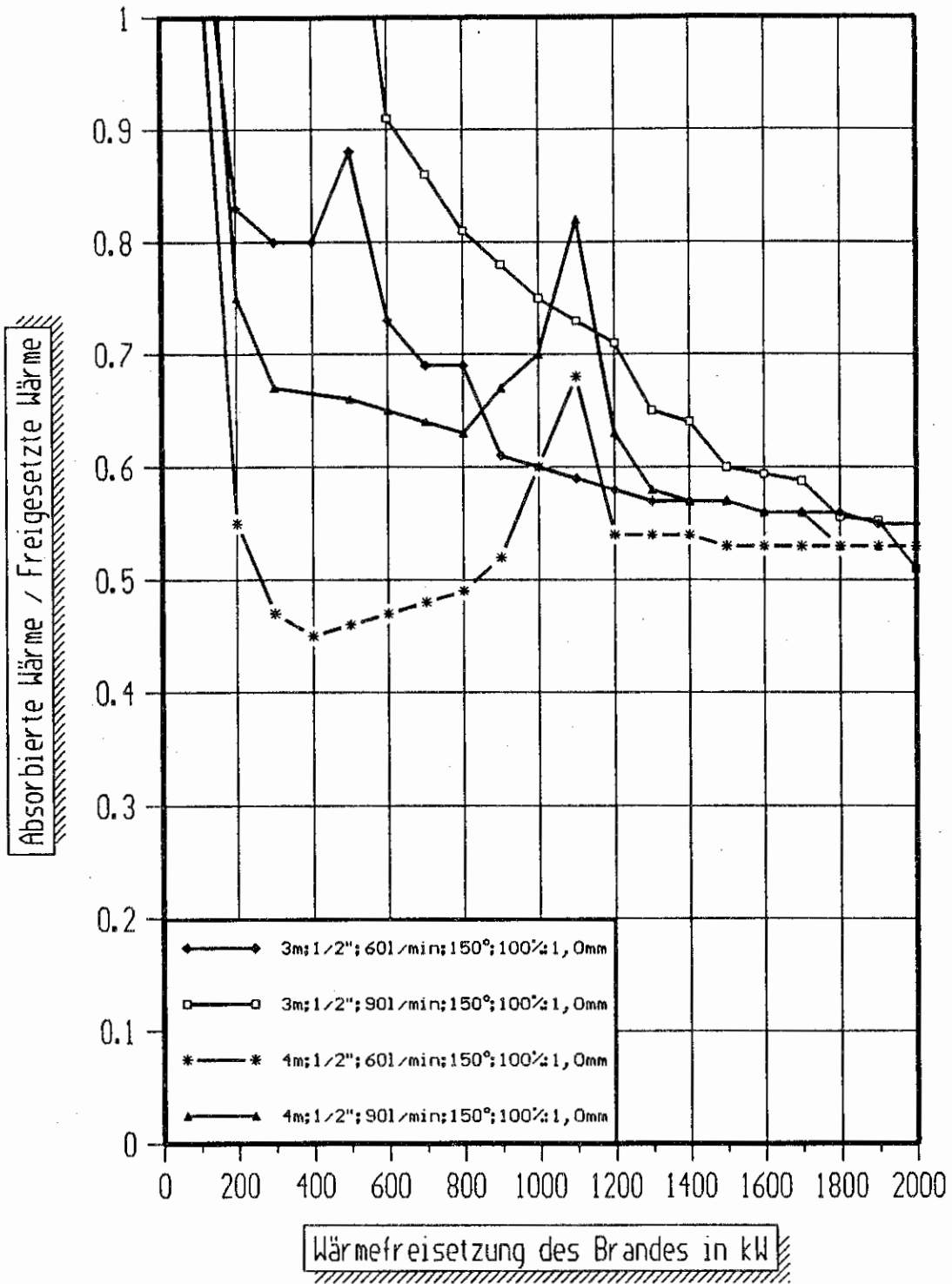


Bild 18.1 Vergleich des Verhältnisses der durch den Tropfenschwarm auf dem Flugweg absorbierten Wärme und der durch den Brand freigesetzten Wärme bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 1,0 mm.

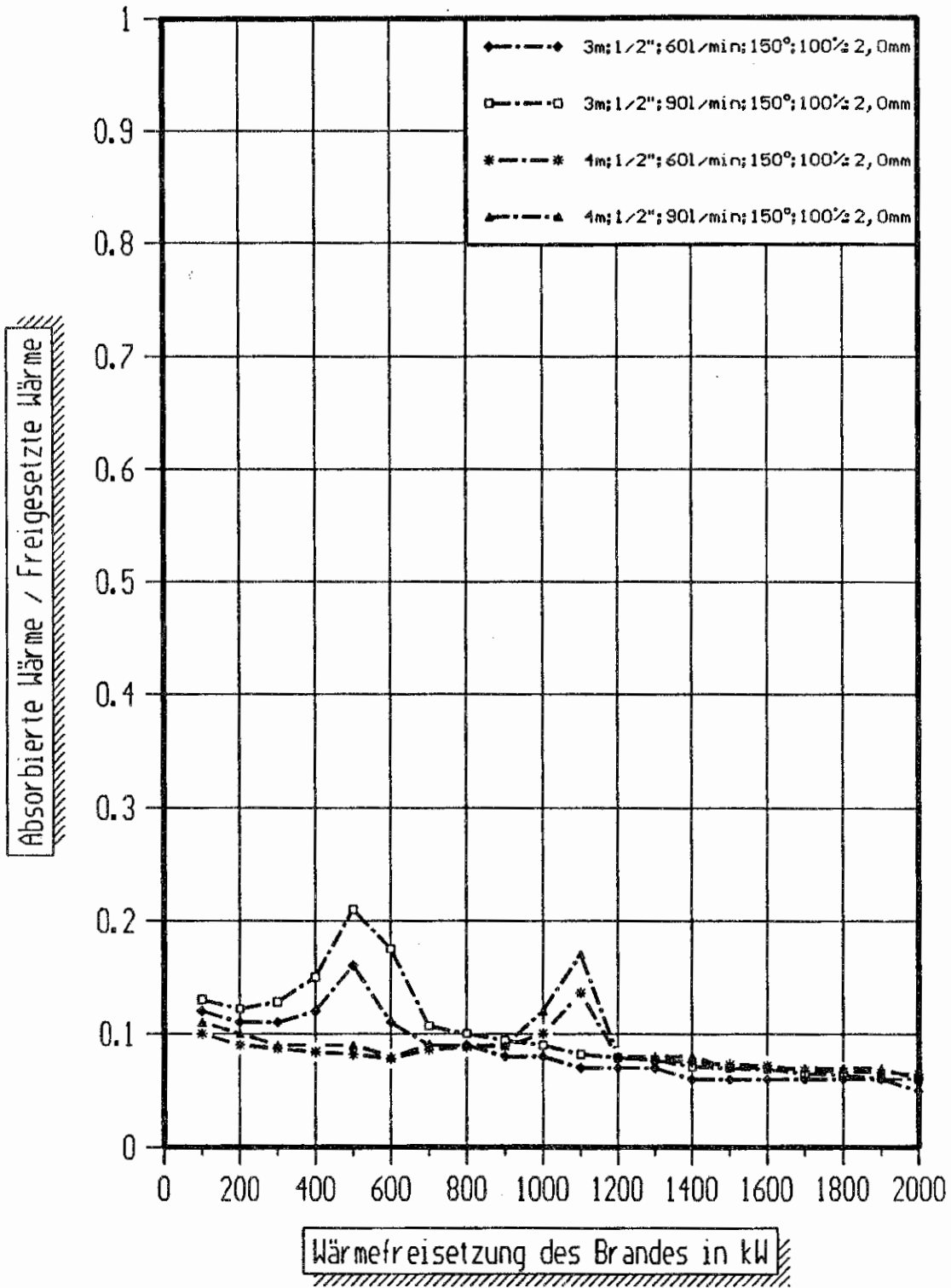


Bild 18.2 Vergleich des Verhältnisses der durch den Tropfenschwarm auf dem Flugweg absorbierten Wärme und der durch den Brand freigesetzten Wärme bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 2,0 mm.

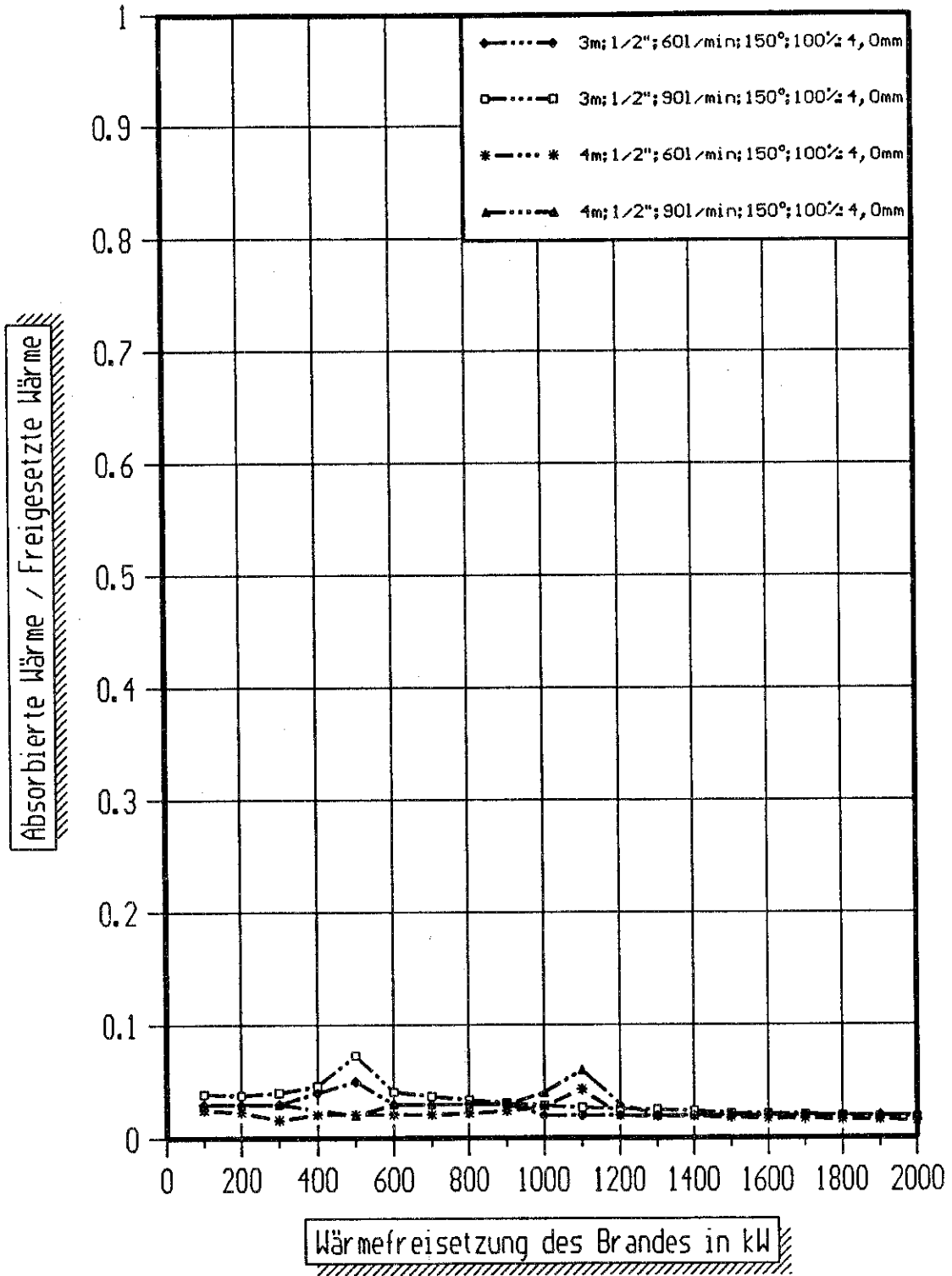


Bild 18.3 Vergleich des Verhältnisses der durch den Tropfenschwarm auf dem Flugweg absorbierten Wärme und der durch den Brand freigesetzten Wärme bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 4,0 mm.

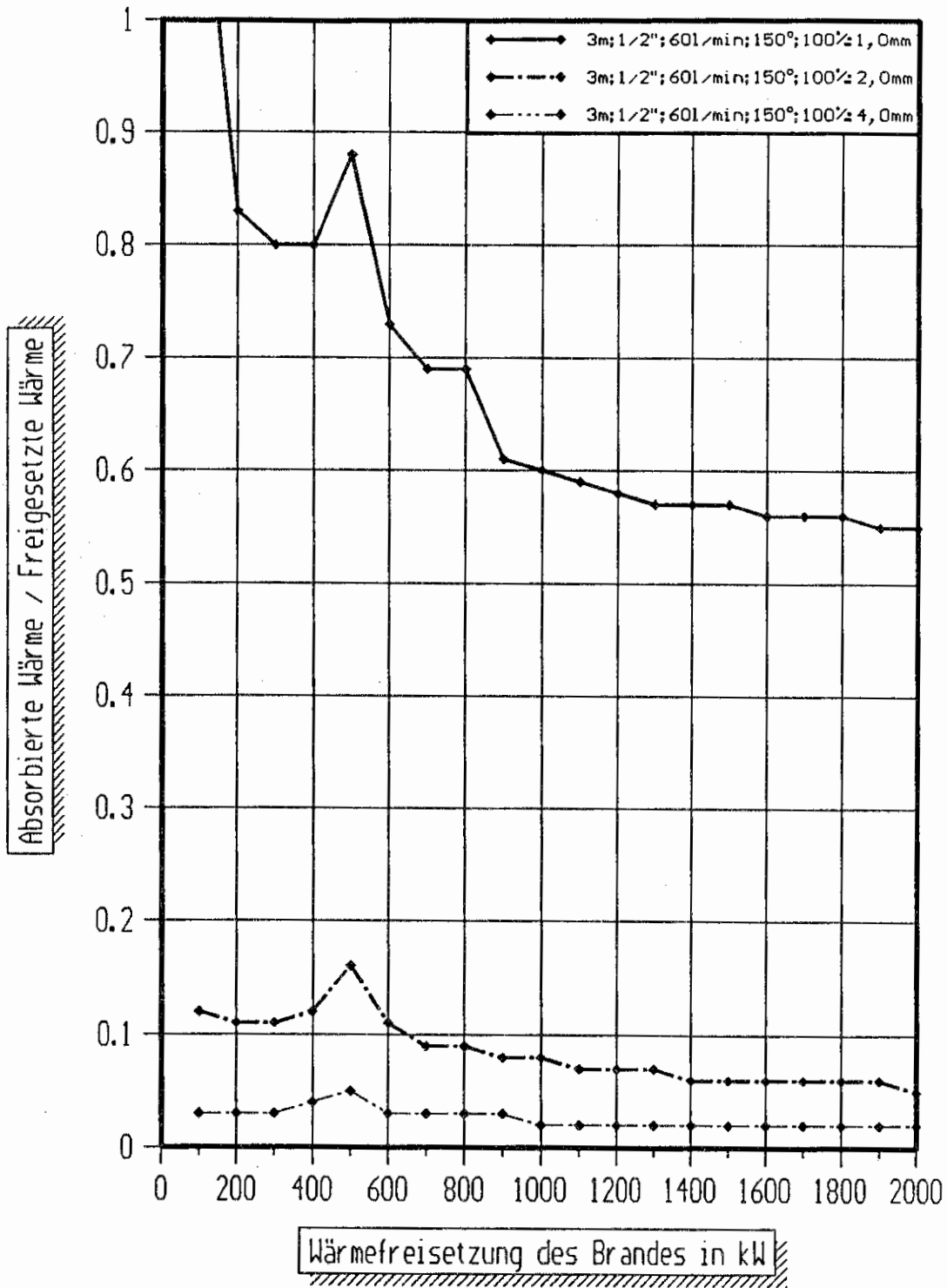


Bild 19.1 Vergleich des Verhältnisses der durch den Tropfenschwärm auf dem Flugweg absorbierten Wärme und der durch den Brand freigesetzten Wärme bei denjenigen Tropfen, die in der Lage sind, den Brandherd zu erreichen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

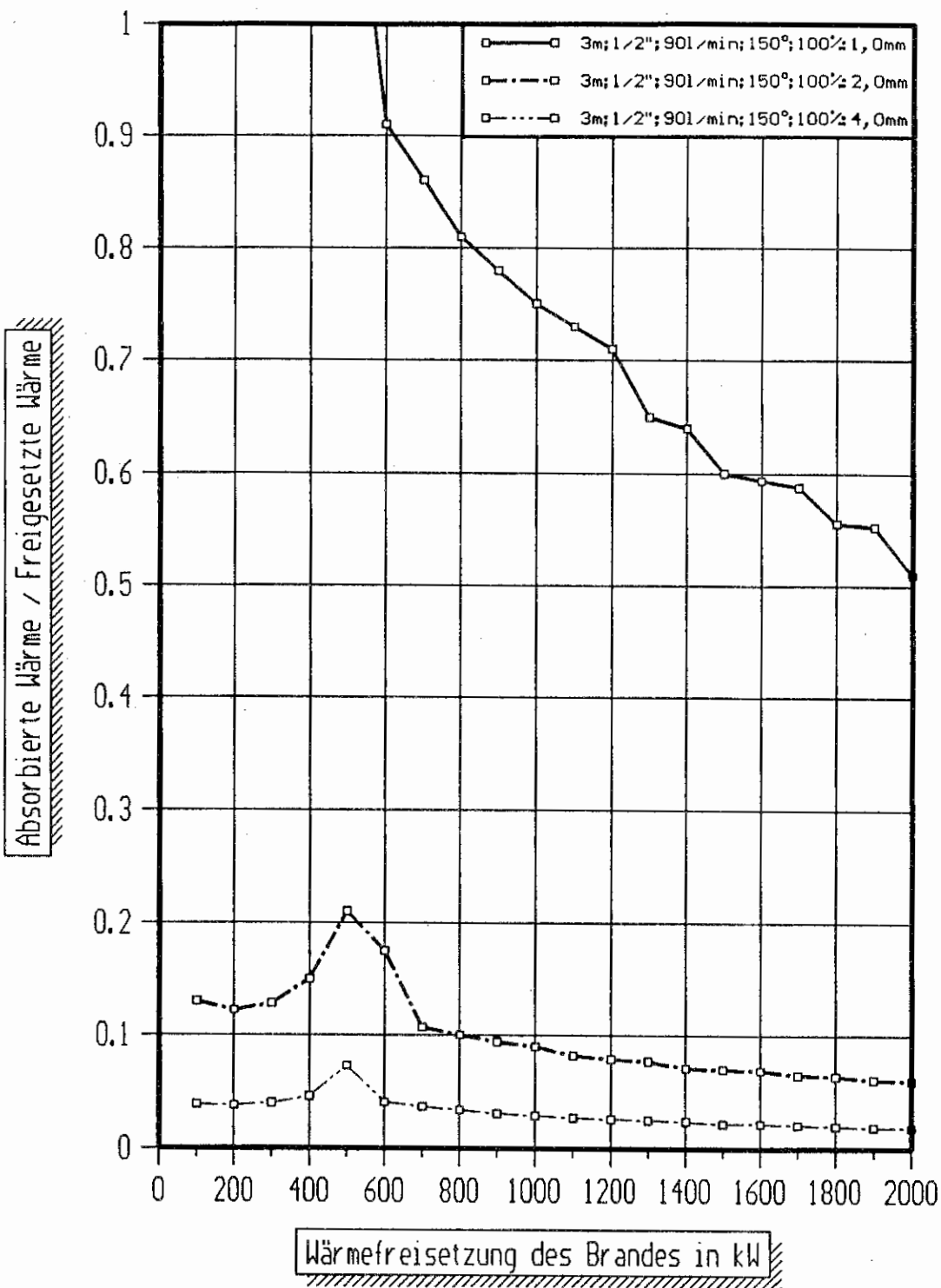


Bild 19.2 Vergleich des Verhältnisses der durch den Tropfenschwarm auf dem Flugweg absorbierten Wärme und der durch den Brand freigesetzten Wärme bei denjenigen Tropfen, die in der Lage sind, den Brandherd zu erreichen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.

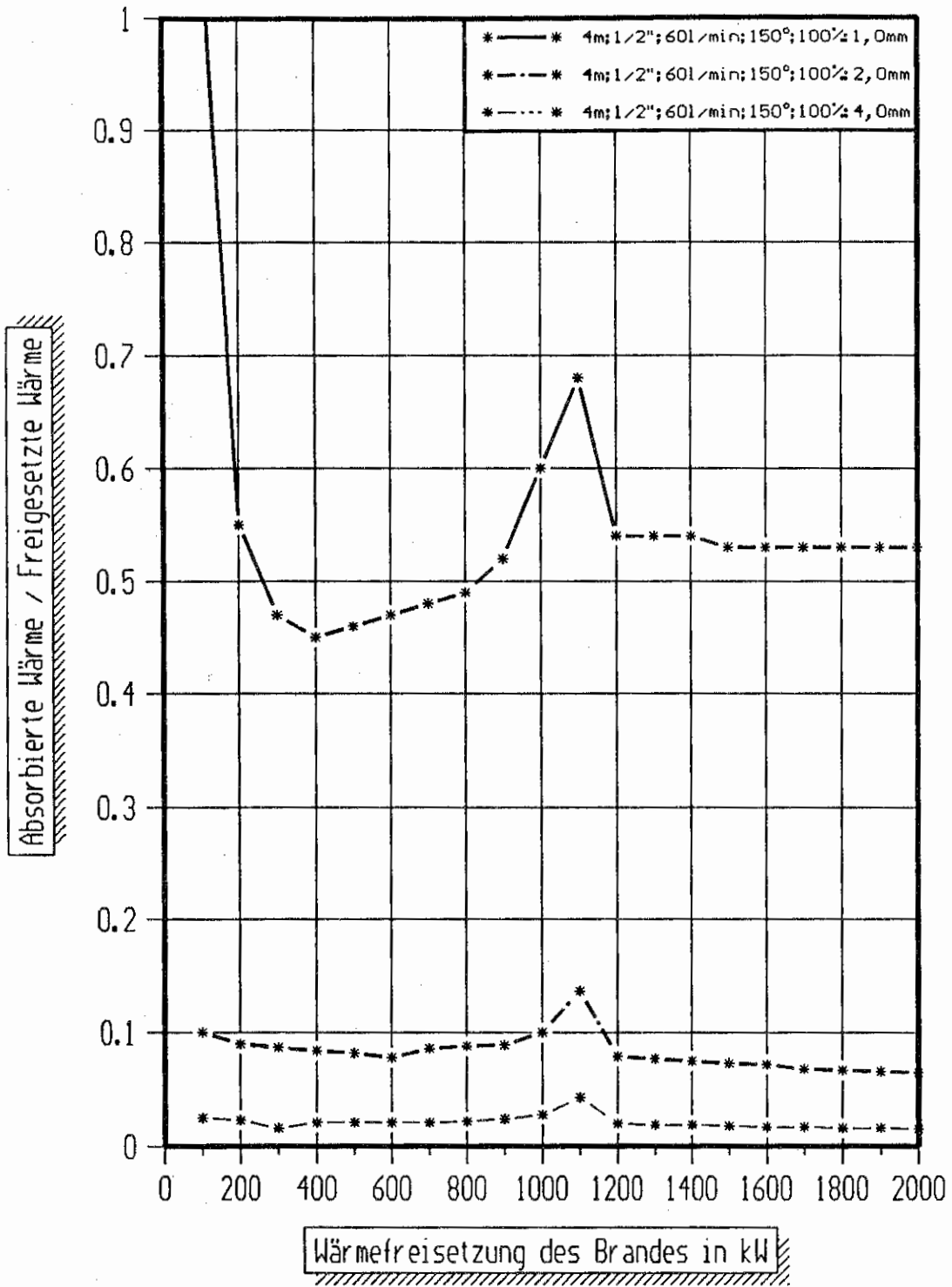


Bild 19.3 Vergleich des Verhältnisses der durch den Tropfenschwarm auf dem Flugweg absorbierten Wärme und der durch den Brand freigesetzten Wärme bei denjenigen Tropfen, die in der Lage sind, den Brandherd zu erreichen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 60 l/min.

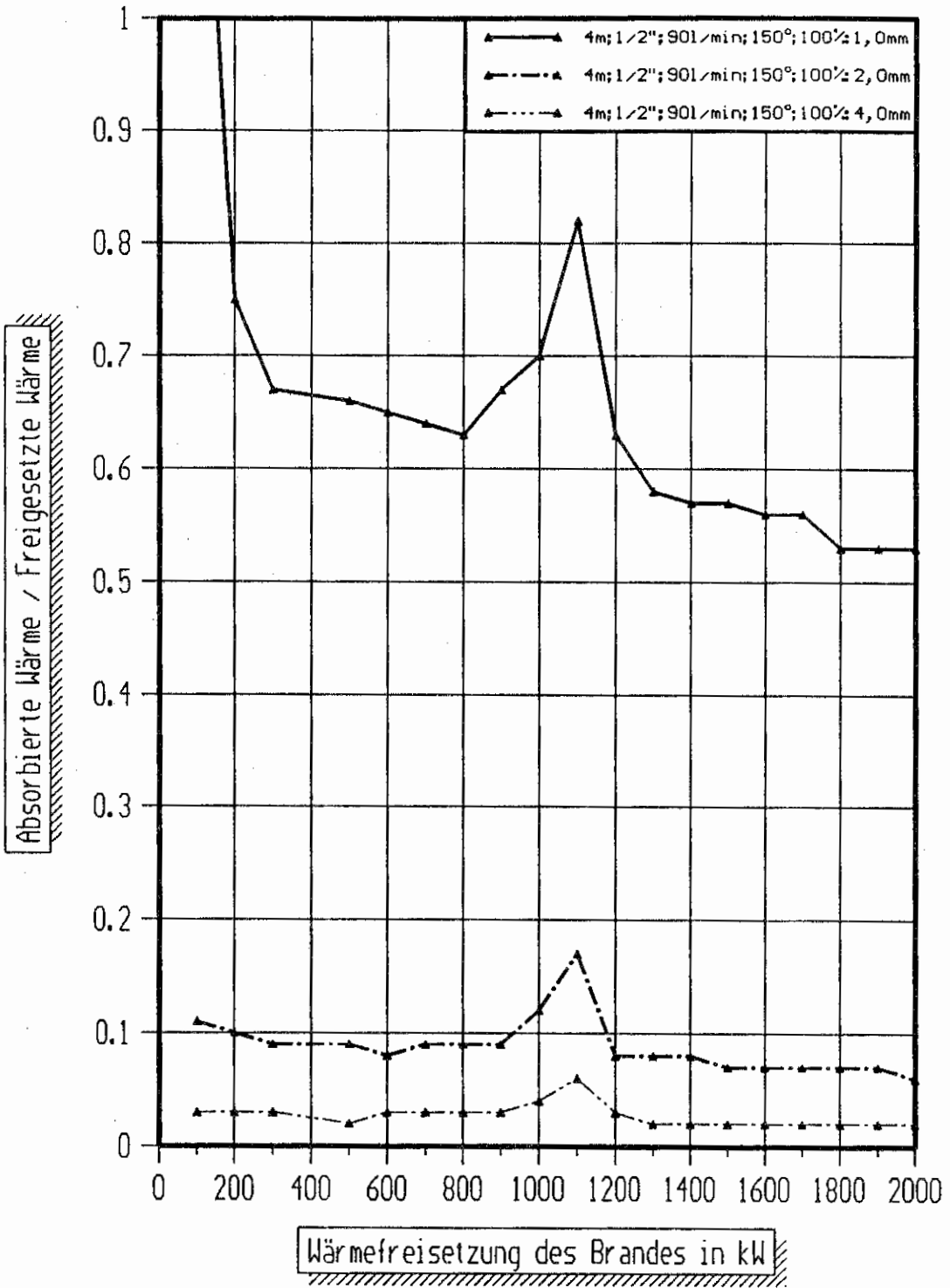


Bild 19.4 Vergleich des Verhältnisses der durch den Tropfenschwarm auf dem Flugweg absorbierten Wärme und der durch den Brand freigesetzten Wärme bei denjenigen Tropfen, die in der Lage sind, den Brandherd zu erreichen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 90 l/min.