

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

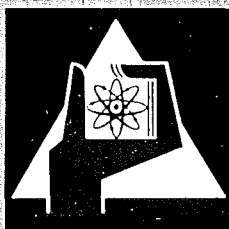
August 1970

KFK 1242

Institut für Reaktorbauelemente

Theoretische Untersuchungen zur Verdampfung von
Wassertropfen in überhitztem Wasserdampf

I. Gaballah



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M.B.H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

August 1970

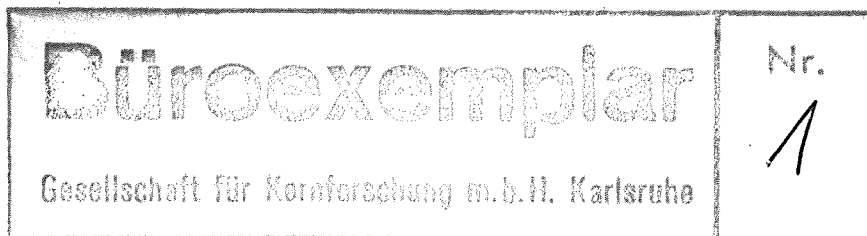
KFK 1242

INSTITUT FÜR REAKTORBAUELEMENTE

Theoretische Untersuchungen zur Verdampfung von
Wassertropfen in überhitztem Wasserdampf

von

I. Gaballah



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG MBH., KARLSRUHE



Kurzfassung

Der Verdampfungsvorgang eines Wassertropfens im überhitzten Dampf wurde untersucht. Das System der Differential-Gleichungen erster Ordnung, das die verschiedenen Vorgänge beschreibt, wurde numerisch gelöst. Durch numerische Berechnungen wurde der Einfluß der verschiedenen Parameter auf den zeitlichen Verlauf der verschiedenen Tropfenkenngrößen untersucht. Die Untersuchungen zeigten eine starke Abhängigkeit der gesamten Verdampfungszeit vom Tropfendurchmesser und von der relativen Geschwindigkeit zwischen Dampf und Tropfen. Bereits verhältnismäßig niedrige Relativgeschwindigkeiten führen zur erheblichen Verkürzung der Verdampfungszeit, im Vergleich zur Verdampfungszeit bei Relativgeschwindigkeit gleich Null.

Abstract

The process of evaporation of a drop of water in superheated steam was investigated. The system of first order differential equations describing the different events was solved numerically. The influence of various parameters on the time curve of the different drop characteristics was investigated by numerical calculations. The investigations showed a strong dependence of the entire time of evaporation on the diameter of the drop and the relative velocity between the steam and the drop. Already relatively low relative velocities resulted in a considerable reduction of the time of evaporation as against the time of evaporation at the relative velocity of zero.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Verwendete Formelzeichen	
1. Einführung	1
2. Grundgleichungen	1
a) Die Energiegleichung eines Tropfens	1
b) Die Bewegungsgleichung eines Tropfens	4
c) Thermische und kalorische Zustandsgleichung	5
d) Die Vorwärmungs- bzw. die Verdampfungslänge	5
3. Numerische Untersuchungen	5
4. Zusammenfassung	8
Literaturverzeichnis	9

Verwendete Formelzeichen

Bezeichnungen

A_s	m^2	Oberfläche
B	-	Spalding-Zahl
c	m/s	Absolute Geschwindigkeit
C_w	-	Widerstandskoeffizient
C_p	kcal/kg °	Spezifische Wärmekapazität unter konstantem Druck
d	m	Durchmesser
F	N	Kraft
h	kcal/kg	Spezifische Enthalpie
L	m	Länge
m	kg	Masse
Nu	-	Nusselt-Zahl
Pr	-	Prandtl-Zahl
q	kcal/kg	Spezifische Wärmemenge
r	kcal/kg	Verdampfungswärme
Re	-	Reynolds-Zahl
T	°K	Absolute Temperatur
v	m^3/kg	Spezifisches Volumen
w	m/s	Relative Geschwindigkeit zwischen Dampf und Tropfen
α	$kcal/m^2 s °$	Wärmeübergangszahl
η	$kp s/m^2$	Dynamische Viskosität
λ	$kcal/m h °$	Wärmeleitvermögen
ρ	kg/m^3	Dichte
τ	s	Zeit

Indizes und sonstige Zeichen

D	Dampf
ges	gesamt
S	Sättigungszustand
T	Tropfen

vor	Vorwärmung
ver	Verdampfung
w	Widerstand
o	Anfangszustand
[]	Schrifttum
()	Beziehung
	Absoluter Wert

1. Einführung

Eine Möglichkeit zur Erzeugung von Sattedampf für die Kühlung eines dampfgekühlten schnellen Brutreaktors bietet die Zufuhr fein verteilten Kondensats in strömenden überhitzten Dampf, das durch die Überhitzungswärme des Dampfes verdampft wird. Die genaue Kenntnis der verschiedenen Vorgänge, die bei solcher Verdampferart auftreten, ist zur optimalen Auslegung des Verdampfers erforderlich.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Verdampfungsvorgang eines einzelnen Tropfens in überhitztem Dampf zu erfassen und den Einfluss der verschiedenen Faktoren auf die Verdampfungszeit, bzw. die Verdampfungslänge zu untersuchen. Für die Untersuchungen wurden folgende Annahmen vorausgesetzt: gleiche Stromlinien für den Tropfen und den Dampf. - Die Beziehungen zur Bestimmung der Nusselt-Zahl und des Widerstandskoeffizienten, die bei niedrigem Druck ermittelt worden sind, sollen auch bei hohen Drücken anwendbar sein.

2. Grundgleichungen

a) Die Energiegleichung eines Tropfens:

Es wurde vorausgesetzt, dass sich der gesamte Wärmeübergangsvorgang in zwei unabhängige Vorgänge unterteilen lässt (Abb. 1).

1. Erwärmung des Wassertropfens auf die Sättigungstemperatur T_s : Während der Vorwärmungszeit wird die übertragene Wärme zwischen Dampf und Tropfen q in Tropfenenthalpie umgewandelt. Die Energiegleichung lautet:

$$m_{\text{T}} \frac{d h_{\text{T}}}{d \tau} = q \quad (1)$$

wobei m_{T} und h_{T} die Tropfenmasse und die Tropfenenthalpie bezeichnen.

2. Verdampfung des Wassertropfens: Ist die Sättigungstemperatur erreicht, so wird die übertragene Wärme q in Verdampfungswärme umgewandelt. Die Energiegleichung lautet:

$$r \frac{dm_{\text{T}}}{d \tau} = q \quad (2)$$

wobei die Verdampfungswärme r eine Funktion des Druckes bzw. der Temperatur ist.

Die übertragene Wärme q lässt sich als Funktion der Wärmeübergangszahl α , der Tropfenoberfläche A_{S} sowie des Temperaturgradienten ΔT ausdrücken

$$q = \alpha A_{\text{S}} \Delta T \quad (3)$$

Die Wärmeübergangszahl α lässt sich aus der Nu-Zahl bestimmen

$$\alpha = \lambda_{\text{D}} \text{Nu} / d_{\text{T}} \quad (4)$$

Hierin bedeuten:

λ_{D} das Wärmeleitvermögen des Dampfes - Eine Funktion des Druckes und der Temperatur.

d_{T} der Tropfendurchmesser.

Experimentell ermittelte Beziehungen für Nu-Zahlen bei Verdampfung von Flüssigkeitstropfen bei niedrigen Drücken sind in der Literatur bekannt [1 - 4].

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der wichtigen Nu-Beziehungen. Beziehung (1) wurde für unsere Untersuchungen aus folgenden Gründen angewendet:

- Die Messungen sind für Wassertropfen im Dampf durchgeführt.
- Der Bereich der Dampftemperatur, des Tropfendurchmessers und der Reynolds-Zahl entspricht am besten von allen Beziehungen unserem Untersuchungsbereich.
- Die durch diese Beziehung ermittelten Nu-Zahlen ergeben die niedrigsten Werte aller Beziehungen (Abb. 2), d.h. durch Anwendung dieser Gleichung erhält man längere Verdampfungszeiten und liegt damit auf der sicheren Seite der Berechnung.

Die hier angewendete Formel lautet:

$$\text{Nu} = \frac{1}{(1+B)^{0,6}} (2,0 + 0,369 \text{Pr}^{1/3} \text{Re}^{1/2}) \quad (5)$$

Hierin bedeuten:

Pr Prandtl-Zahl

$$\text{Pr} = c_{pD} \mu_D / \lambda_D \quad (6)$$

Re Reynolds-Zahl

$$\text{Re} = \frac{d_T \rho_D w}{\mu_D} \quad (7)$$

B Spalding-Zahl

$$B = \frac{c_{pD} \Delta T}{r} \quad (8)$$

w Die relative Geschwindigkeit zwischen Dampf und Tropfen.

Die dynamische Zähigkeit μ_D , die spezifische Wärmekapazität unter konstantem Druck d_{pD} , die Dampfdichte ρ_D sowie das Wärmeleitvermögen λ_D wurden für eine mittlere Dampftemperatur bestimmt. Diese wird als das arithmetische Mittel aus Dampftemperatur und Tropfentemperatur berechnet.

Neuere Messungen [5 - 7] für Verdampfung von Treibstofftropfen im Luftstrom bei hohen Drücken zeigten, dass man kürzere Verdampfungszeiten als aus den bei niedrigen Drücken ermittelten Beziehungen erhält. Für genauere quantitative Untersuchungen bei hohen Drücken und hohen Temperaturen für Wassertropfenverdampfung sind daher Messungen der Nu-Zahlen bei diesen Bedingungen erforderlich.

b) Die Bewegungsgleichung eines Tropfens

Die Bewegungsgleichung eines senkrecht bewegten Tropfens lautet (Abb. 1)

$$\rho_T \frac{\pi}{6} d_T^3 \frac{d c_T}{dt} = - \frac{\pi}{6} d_T^3 g (\rho_T - \rho_D) - C_w \frac{\pi}{4} d_T^2 \frac{\rho_D |w| w}{2} \quad (9)$$

Der Widerstandskoeffizient C_w ist definiert durch:

$$C_w = \frac{\text{Widerstand}}{\text{Projektionsfläche} \cdot \left(\frac{\rho_D w^2}{2} \right)} \quad (10)$$

Experimentell ermittelte Beziehungen für den Widerstandskoeffizienten C_w in Abhängigkeit von der Re-Zahl sind in der Literatur bekannt [8 - 13]. Abb. 3 zeigt eine Zusammenstellung der wichtigen Beziehungen. Es stellte sich als zweckmässig heraus, die Beziehung

$$C_w = \frac{24}{Re} (1 + 0,197 Re^{0,63} + 2,6 \cdot 10^{-4} Re^{1,38}) \quad (11)$$

zu verwenden, da sie im Vergleich zu den anderen Beziehungen höhere Widerstandskoeffizienten liefert und man als Folge davon längere Verdampfungszeiten erhält. Auch hier sind Messungen für die Widerstandskoeffizienten von Wassertropfen im Wasserdampf unter hohen Drücken und Temperaturen erforderlich.

c) Thermische und kalorische Zustandsgleichung

Das spezifische Volumen und die spezifische Enthalpie des Wasserdampfes bzw. des Wassers werden durch die thermische und die kalorische Zustandsgleichung ausgedrückt

$$v_D = v_D(p, T_D) \quad ; \quad v_W = v_W(p, T_W) \quad (12)$$

$$\text{und } h_D = h_D(p, T_D) \quad ; \quad h_W = h_W(p, T_W) \quad (13)$$

d) Die Vorwärmungs- bzw. Verdampfungslänge wird aus der Beziehung berechnet

$$\frac{dL}{d\tau} = c_T \quad (14)$$

3. Numerische Untersuchungen

- a) Das Gleichungssystem wurde mit Hilfe des Runge-Kutta-Verfahrens mit veränderlicher Schrittweite gelöst.

- b) Den Verlauf der Tropfenmasse, der Tropfentemperatur, sowie der Tropfengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit zeigen Abb. 4, 5 und 6. Aus den Bildern erkennt man folgendes:
- Die Vorwärmungszeit stellt einen kleinen Teil der gesamten Verdampfungszeit dar.
 - Der Tropfen wird in kurzer Zeit wegen des Widerstandes auf die Dampfgeschwindigkeit abgebremst, danach bestimmt das Tropfengewicht den Verlauf der Tropfengeschwindigkeit.
- c) Abb. 7 zeigt den Einfluss des Tropfendurchmessers auf die Vorwärmungszeit und die Verdampfungszeit eines Tropfens. Es ist folgendes zu erkennen: Die gesamte Verdampfungszeit eines Tropfens nimmt mit dem Tropfendurchmesser zu. Die Proportionalität konnte in der Form $\tau_{\text{ges}} \sim d^n$ ausgedrückt werden, wobei $1 < n < 2$ ist. Lässt man die relative Geschwindigkeit zwischen Dampf und Tropfen gleich Null werden, so kann man zeigen, dass $n = 2$ wird, wie oft in der Literatur angenommen wurde [15].
- Wenn man das Tropfengewicht in der Berechnung nicht berücksichtigt, erhält man über einen grossen Teil der gesamten Verdampfungszeit eine Relativgeschwindigkeit von Null. Das Tropfengewicht verursacht jedoch eine Verzögerung bzw. Beschleunigung des Tropfens je nachdem ob sich der Tropfen nach oben oder nach unten bewegt. Es entsteht eine Relativgeschwindigkeit zwischen Dampf und Tropfen, die zu höheren Wärmeübergangszahlen bzw. kleineren Vorwärmungs- und Verdampfungszeiten führt. Abb. 8 zeigt die Tropfengeschwindigkeit im Vergleich zur Dampfgeschwindigkeit im Gebiet, in dem die Tropfengeschwindigkeit bestimmt wird. Ein Vergleich zwischen der gesamten Verdampfungslänge mit und ohne Berücksichtigung

des Tropfengewichtes für verschiedene Tropfendurchmesser ist in Abb. 7 dargestellt.

- d) Den Einfluss der Anfangsgeschwindigkeit eines Tropfens auf die gesamte Verdampfungszeit zeigt Abb. 9. Das Bild zeigt den Vergleich zwischen zwei Rechenmodellen.

Das erste gilt für einen Tropfen, der sich unter dem Einfluss des Widerstandes und des Tropfengewichtes im Dampf bewegt, wobei die relative Geschwindigkeit zwischen Dampf und Tropfen veränderlich ist. Das zweite Modell ist ein Grenzwert-Modell. Es wurde vorausgesetzt, dass der Tropfen während der gesamten Verdampfungszeit eine konstante relative Geschwindigkeit besitzt.

Das Bild zeigt, dass für den Fall mit veränderlicher Relativgeschwindigkeit die gesamte Verdampfungszeit sehr wenig von der Anfangsgeschwindigkeit abhängt. Das lässt sich als Folge der schnellen Verzögerung des Tropfens gegenüber der Dampfgeschwindigkeit erklären. Nachdem die Tropfengeschwindigkeit die Dampfgeschwindigkeit erreicht hat, bestimmt das Tropfengewicht und der Widerstand die Relativgeschwindigkeit, d.h. die Verdampfungszeit ist unabhängig von der Anfangsgeschwindigkeit. Für grössere Tropfen wird das Verhältnis der Verzögerungszeit zur Gesamtverdampfungszeit kleiner als bei kleineren Tropfen (Abb. 8), d.h. die Anfangsrelativgeschwindigkeit hat einen geringeren Einfluss als bei kleineren Tropfen.

Für das zweite Modell (konstante Relativgeschwindigkeit - w_k) ist aus dem Bild zu erkennen, wie stark eine kleine w_k die gesamte Verdampfungszeit beeinflusst. Eine weitere Erhöhung von w_k erzielt keine grosse Absenkung der Verdampfungszeit. Dagegen bestimmt der Druckverlust bei der Erhöhung von w_k , inwieweit eine solche Erhöhung vertretbar ist.

4. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit der Untersuchung der Verdampfung von Wassertropfen in überhitztem Dampf. Zunächst wurden die Grundgleichungen der verschiedenen Vorgänge formuliert und numerisch gelöst. Durch numerische Berechnungen wurde der Einfluss der verschiedenen Parameter, und zwar des Durchmessers, der Anfangsgeschwindigkeit und des Tropfengewichtes auf den zeitlichen Verlauf der Masse, der Geschwindigkeit und der Temperatur eines Tropfens untersucht. Die Untersuchungen zeigten, wie stark die gesamte Verdampfungszeit vom Tropfendurchmesser, sowie von der Relativgeschwindigkeit zwischen Dampf und Tropfen abhängt. Es wurde gezeigt, dass als Folge des Tropfengewichtes eine relative Geschwindigkeit zwischen Dampf und Tropfen entsteht, die zur erheblichen Absenkung der Verdampfungszeit führt.

Literaturverzeichnis

- [1] L.L. Ross, and T.W. Hoffmann:
Proceedings of the Third International Heat Transfer,
August 7 - 12, 1966, Vol. V, P. 50-59, AIChE, New York

- [2] K. Lee, and D.J. Ryley:
Journal of Heat Transfer Transactions of the ASME,
Nov. 1968, P. 445 - 451

- [3] N. Frössling:
Gerlands Beitr. Geophys. 1938, S. 52

- [4] W. E. Ranz, and W.R. Marshall:
Chemical Engineering Progress; Vol. 48, No. 3, P. 141,
and Vol. 48, No. 4, P. 173

- [5] G.B. Petrazhiskiy: NASA TTF-266, Nov. 1964,
NASA, Washington

- [6] T.P. Torda, and R. Matlosz:
NASA CR-72373, May 1968, Illinois Institute of
Technology, Chicago, Illinois

- [7] W. Savery, and G.L. Borman:
AIAA paper No. 70-6; AIAA 8th Aerospace Sciences
Meeting, New York, Jan. 19-21, 1970

- [8] J.P. Longwell:
Combustion of liquid fuels, in:
B. Lewis et al. (Editors): Combustion Processes;
Oxford University Press, Oxford 1956, P. 425 and 505

- [9] C.T. Crowe, J.A. Nicholls, and R.B. Morrison:
Ninth Symp. (Inter.) on Combustion, 1963

- [10] R.D. Ingebo:
NACA TN 3762, Sep. 1956
- [11] S. Lambiris, and L.P. Combs:
Progress in Astronautics and Rocketry, Vol. 6:
Detonation and Two-Phase Flow, Academic Press,
New York, 1962 (nach [14])
- [12] E. Rabin, A.R. Schallenmüller, and R.B. Lawhead:
Displacement and shattering of propellant droplets;
Final summary report, Washington, D.E., United
States Air Force Office of Scientific Research
AFOSR TR 60-75, March 1960
- [13] Lysevzkij: Izvestija VUZ Energetika 6, 1963, H. 7
- [14] S. Lambiris, L.P. Combs, and R.S. Levine:
Combustion and Propulsion; Fifth AGARD Colloquium;
High Temperature Phenomena, The Mac Millan Company,
New York, 1963.
- [15] F.A. Williams:
Combustion Theory, Addison-Wesley Publishing Company,
Inc., London, 1965

Tabelle 1: Vergleich zwischen verschiedenen Beziehungen zur Berechnung von Nu-Zahl (p = 1 at)

	Beziehung	Stoff		Messbereich			Quelle
		Tropfen	Umgebung	d ₀ mm	Re	T °C	
1	$Nu = \frac{1}{(1+B)^{0,6}} [2+0,369 Pr^{1/3} Re^{0,58}]$	Wasser	Wasserdampf	0,5 - 2,0	40-176	121-258	[1]
2	$Nu = 2,0 + 0,74 Pr^{1/3} Re^{1/2}$	Wasser	Wasserdampf	0,23-1,13	64-250	103-134	[2]
3	$Nu = 2,0 + 0,552 Pr^{1/3} Re^{1/2}$	Wasser- Aniline- Nitro- benzene	Luft	0,042-1,07	0-218	20	[3]
4	$Nu = 2,0 + 0,6 Pr^{1/3} Re^{1/2}$	Wasser	Luft	0,6 - 1,1	0-200	bis 220	[4]

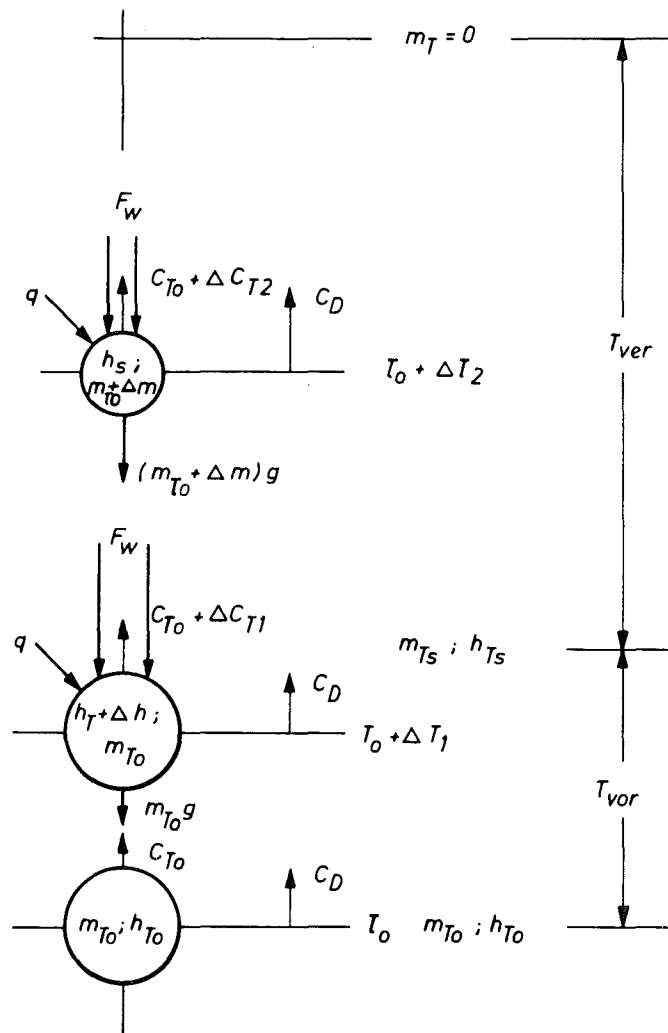


Abb. 1 Das Modell zur Tropfenverdampfung

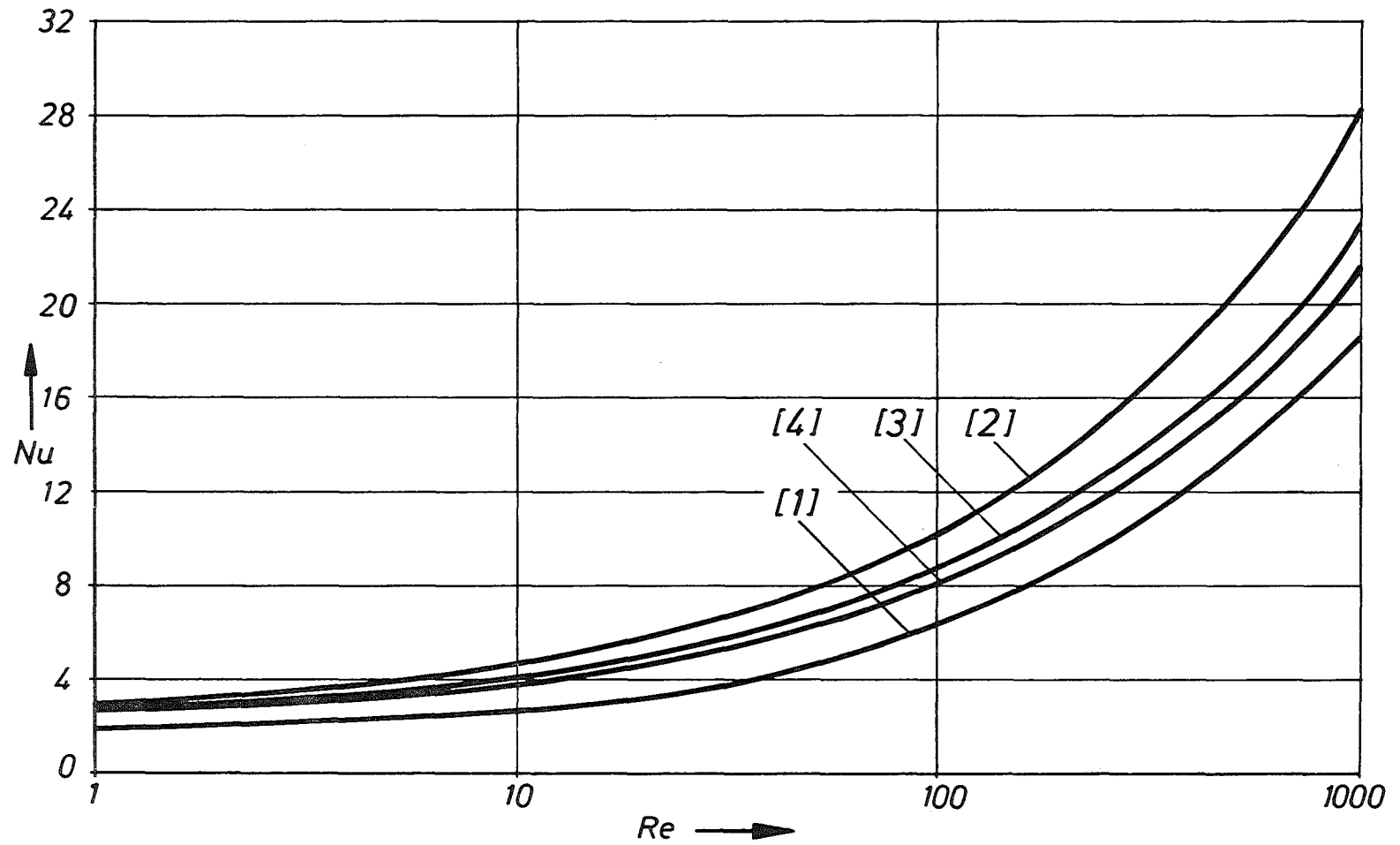


Abb. 2 Nu-Zahl in Abhängigkeit von Re-Zahl nach verschiedenen Beziehungen
(Pr = 1,38; B = 0,476)

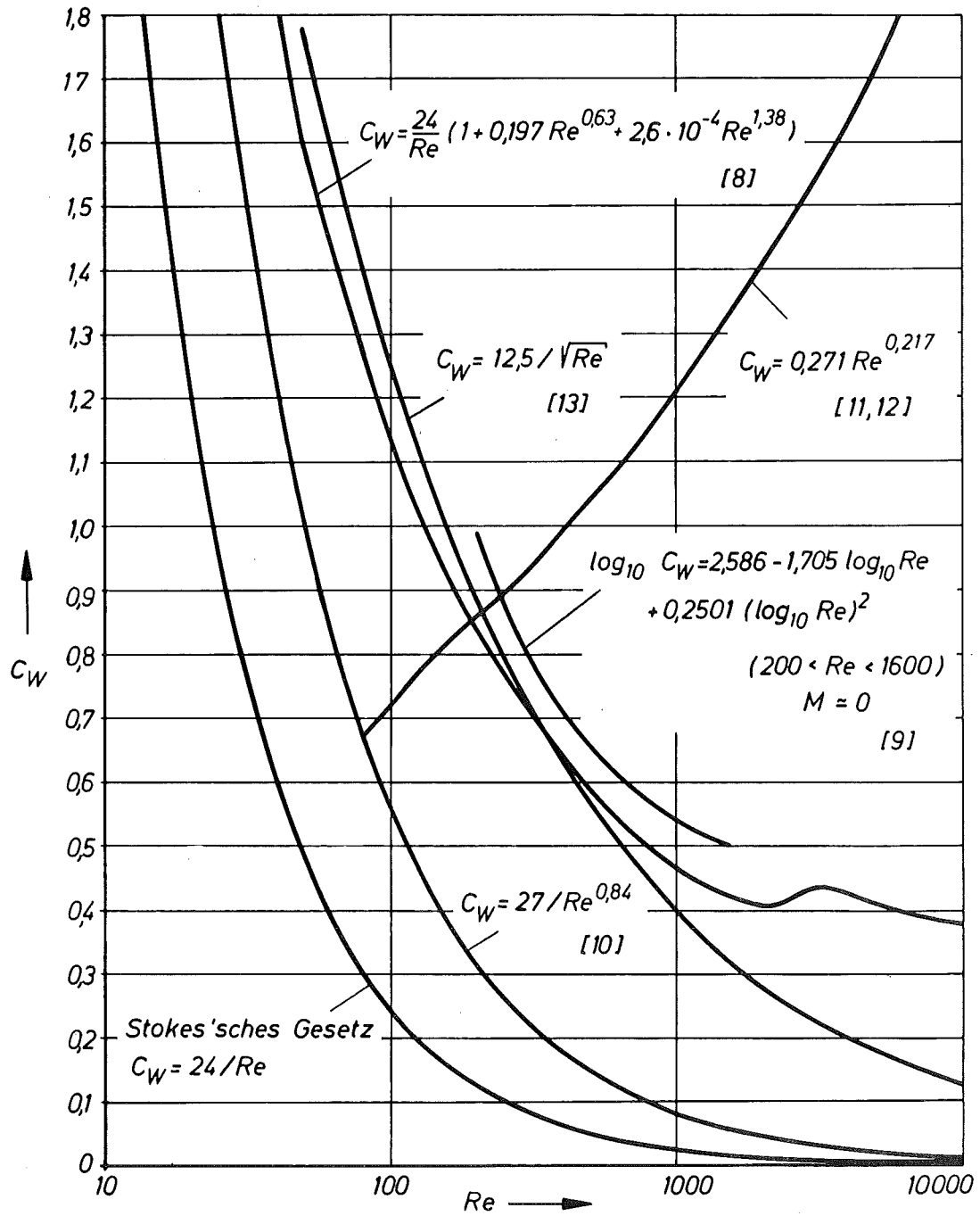


Abb. 3 Widerstandskoeffizient C_w in Abhängigkeit von der Re-Zahl nach verschiedenen Beziehungen

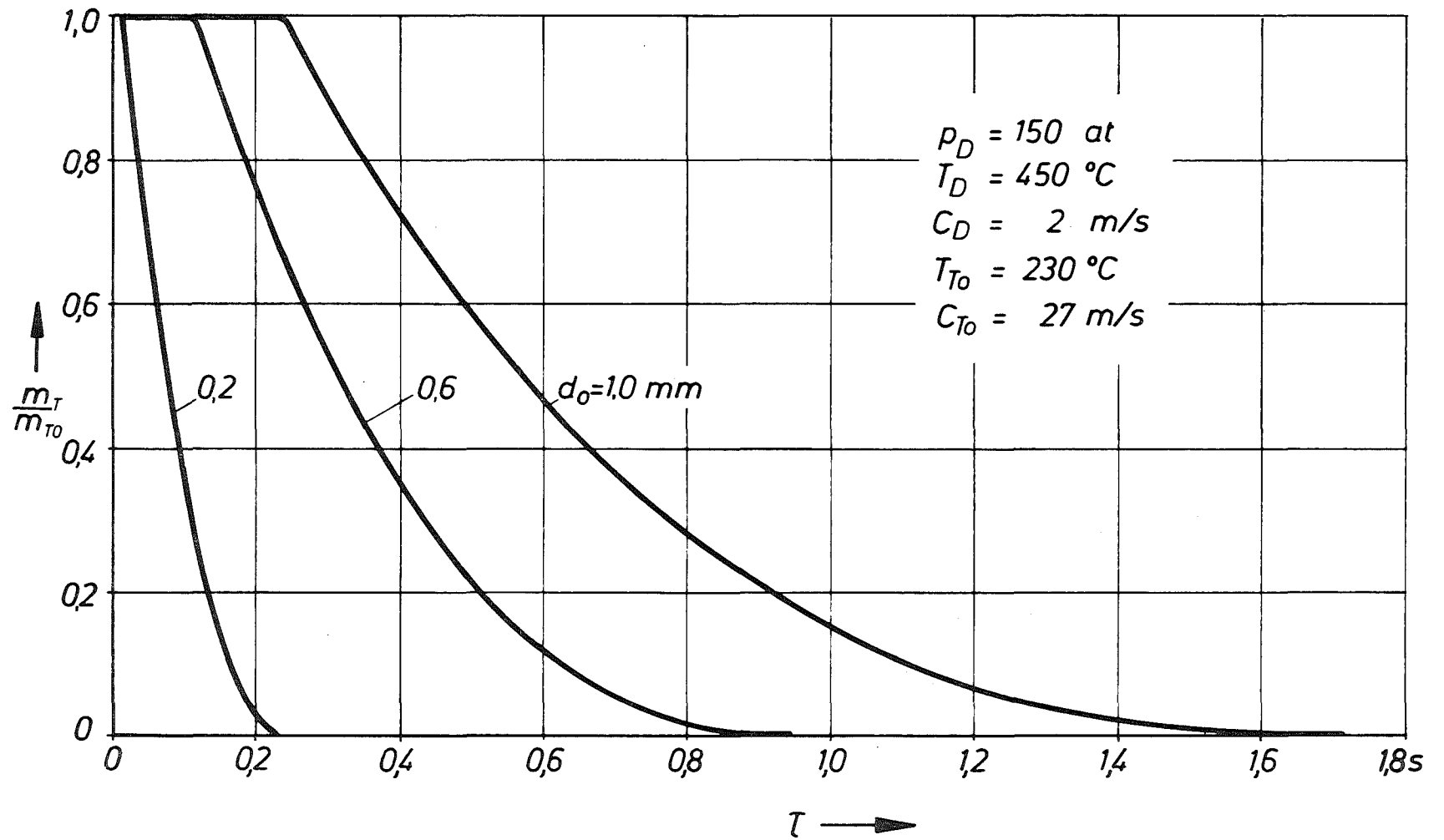


Abb. 4 Der zeitliche Verlauf der Tropfenmasse m_T für Tropfen mit verschiedenem Anfangsdurchmesser d_0

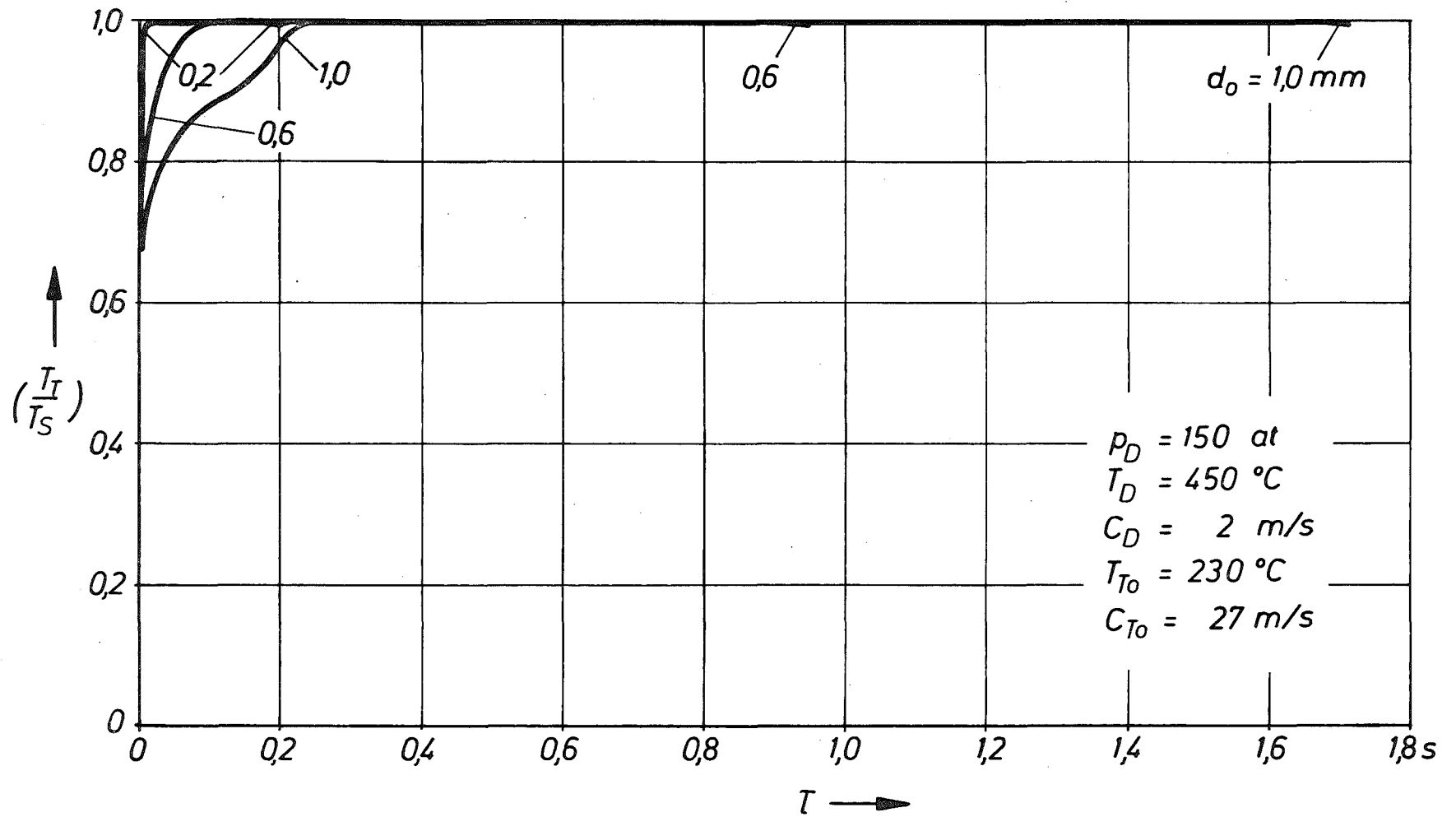


Abb. 5 Der zeitliche Verlauf der Tropfentemperatur T_T für Tropfen mit verschiedenem Anfangsdurchmesser d_0 .

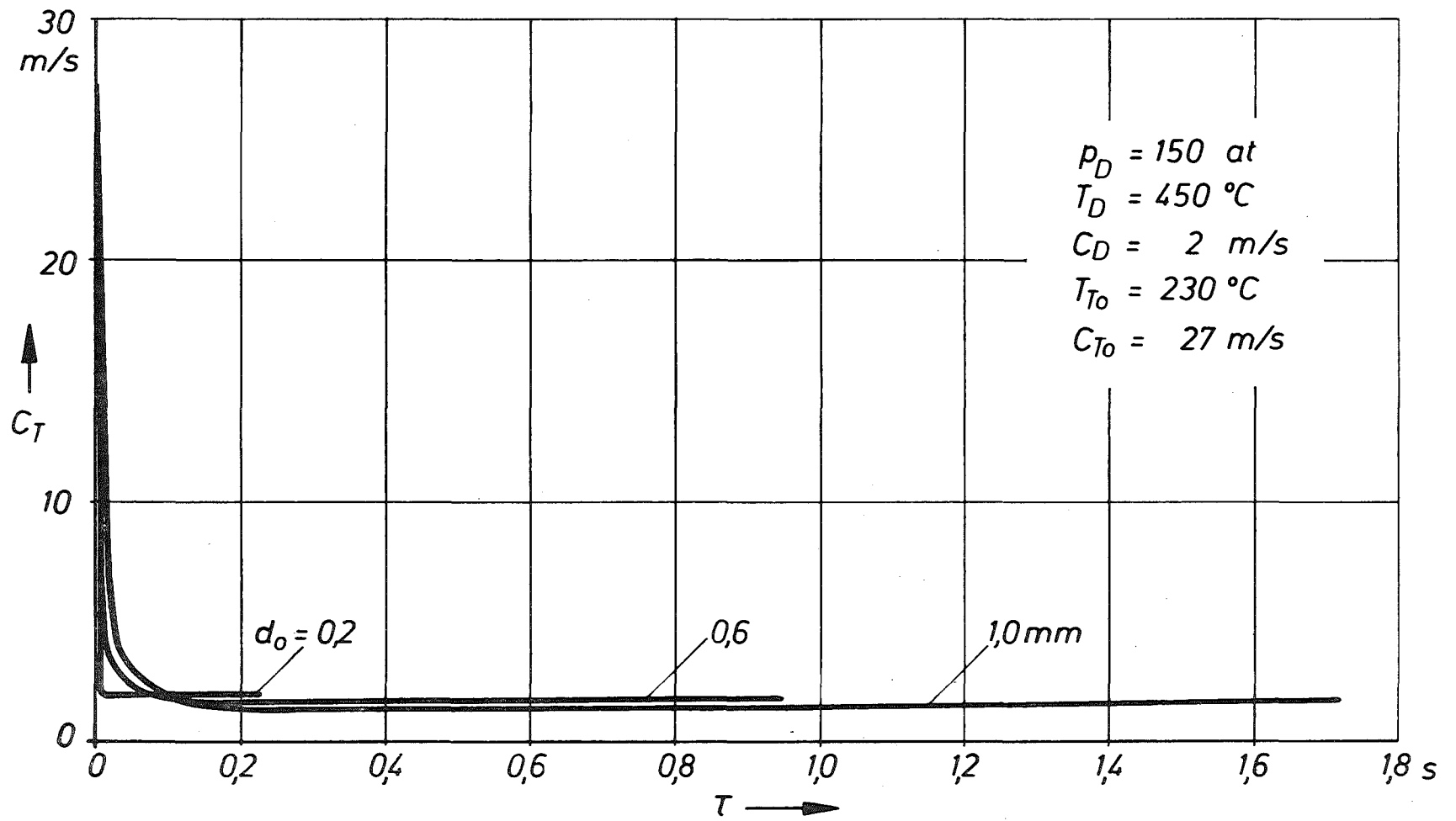


Abb. 6 Der zeitliche Verlauf der Tropfengeschwindigkeit c_T für Tropfen mit verschiedenem Anfangsdurchmesser d_0 .

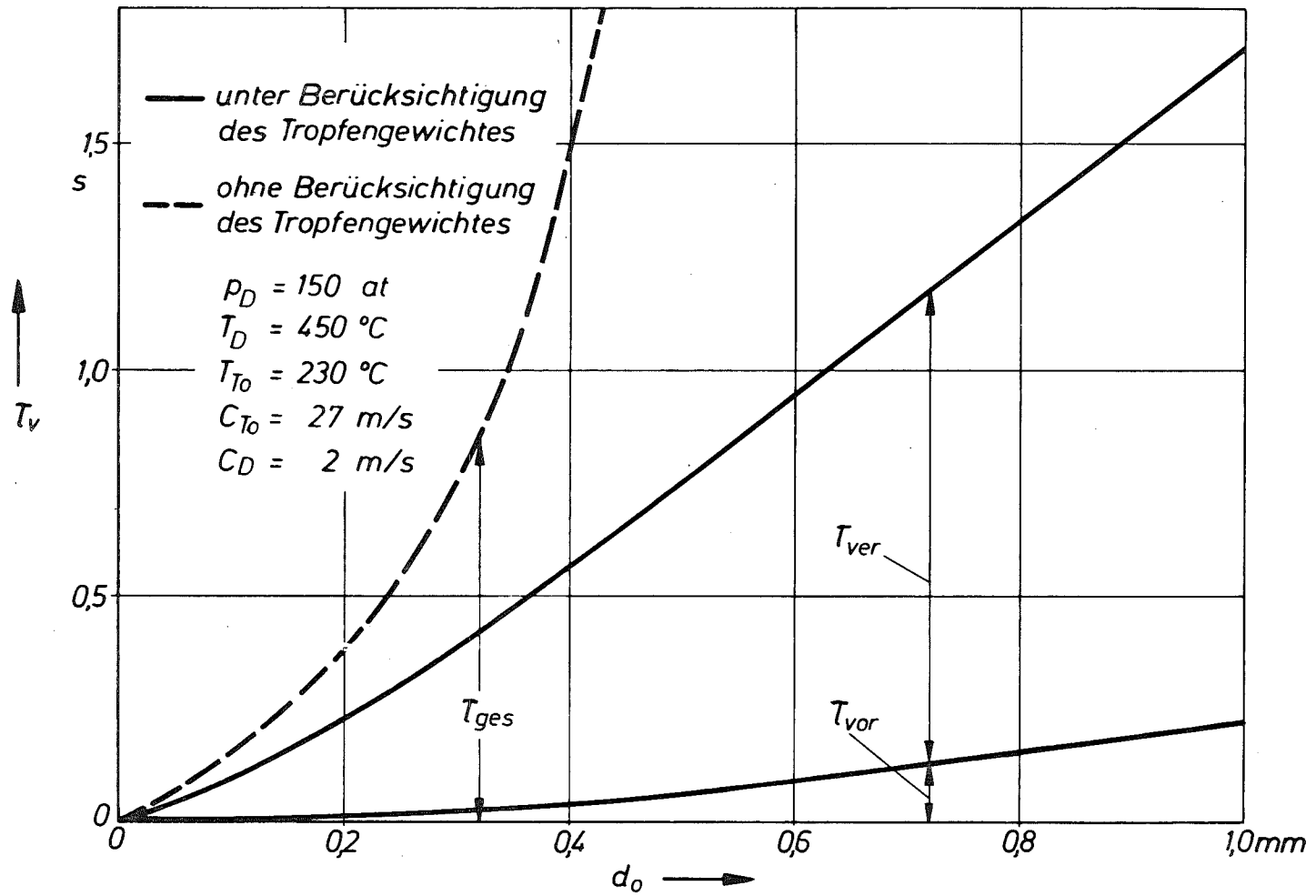


Abb. 7 Der Einfluss des Tropfendurchmessers d_0 auf die Vorwärmungs- und Verdampfungszeit

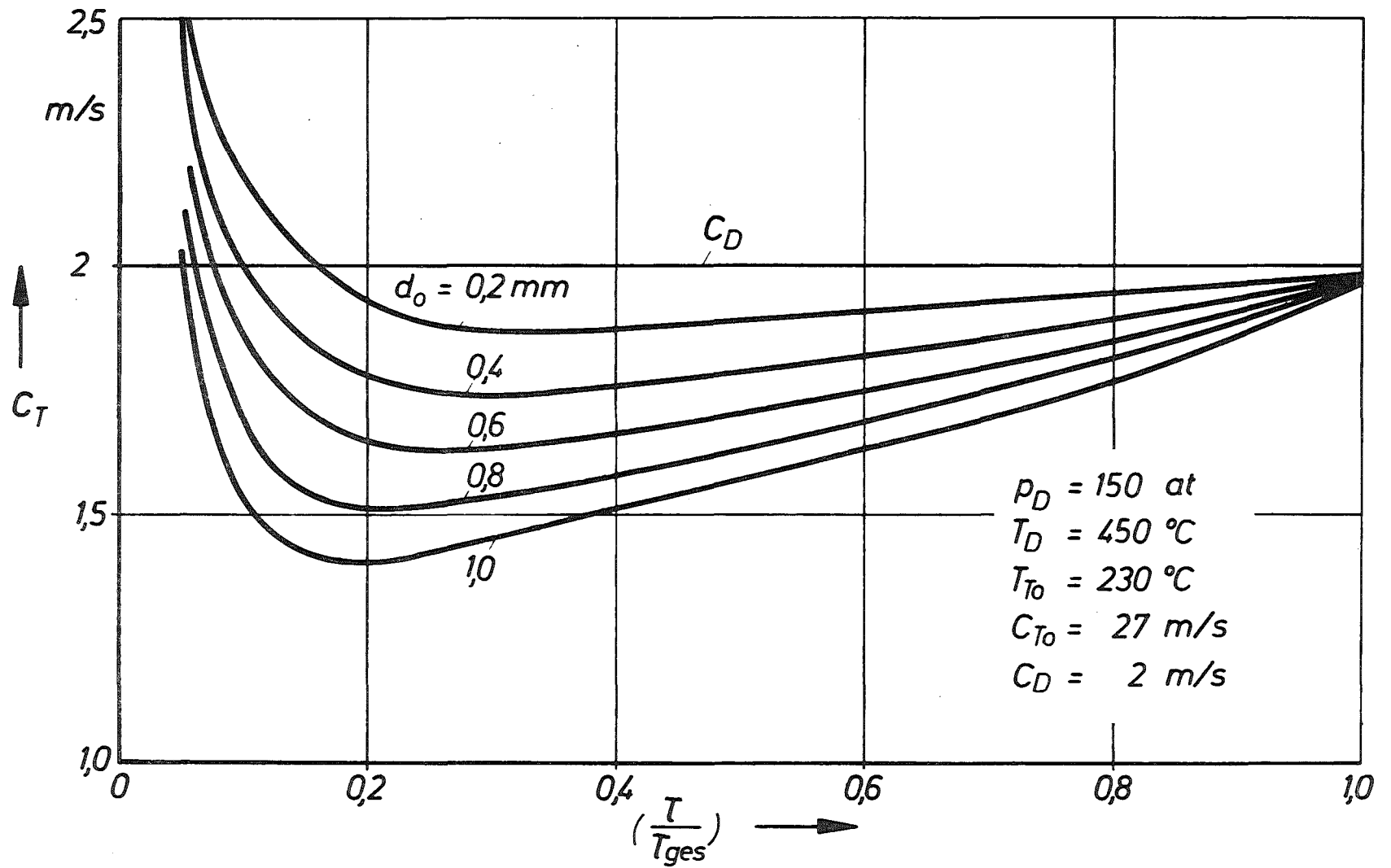


Abb. 8 Die Tropfengeschwindigkeit c_T im Vergleich zur Dampfgeschwindigkeit c_D für Tropfen mit verschiedenem Anfangsdurchmesser d_o

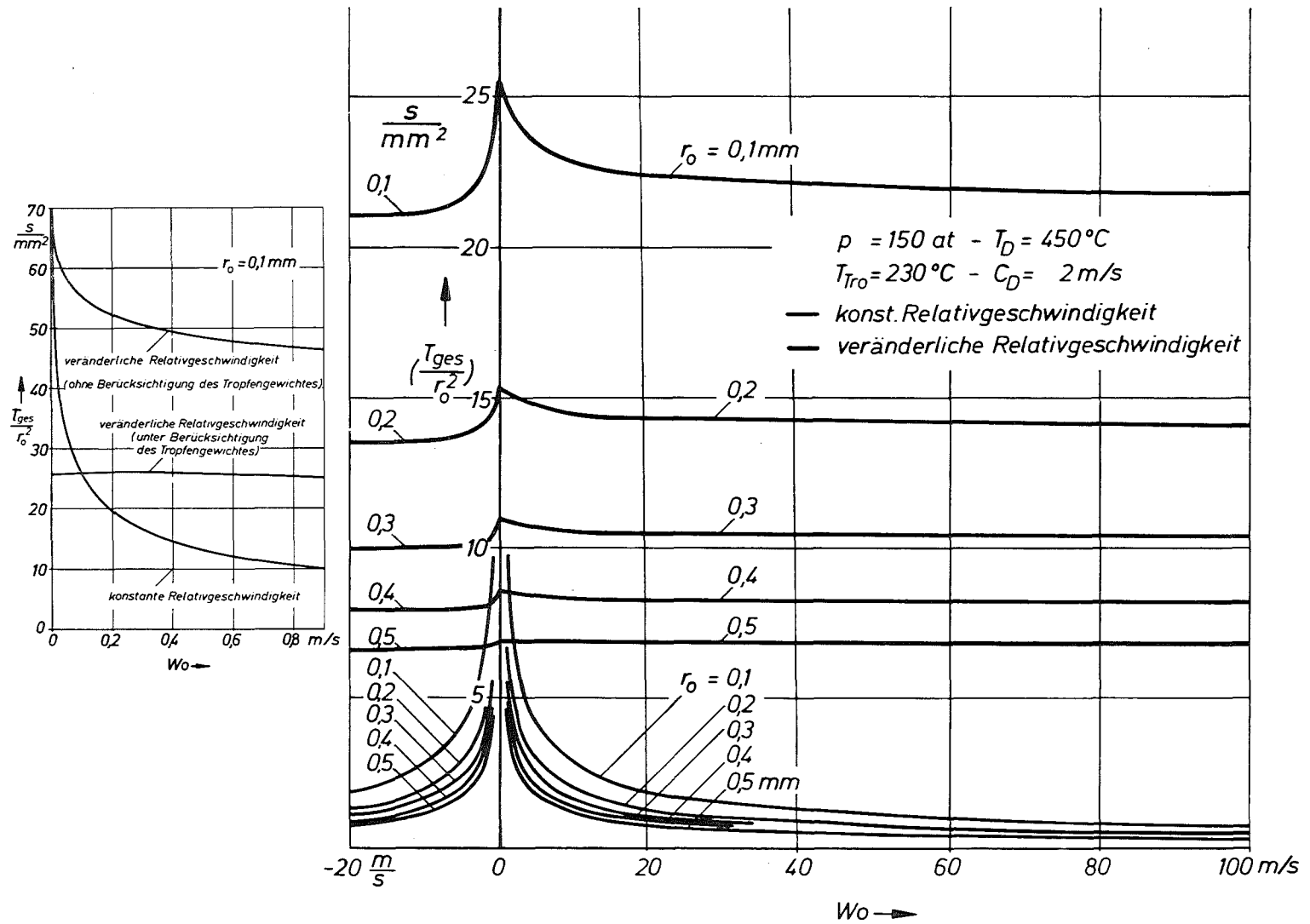


Abb. 9 Der Einfluss der Relativgeschwindigkeit am Anfang der Verdampfung w_0 auf die gesamte Verdampfungszeit τ_{ges} für Tropfen mit verschiedenem Anfangsradius r_0