

Technischer Prüfstand

Nur für den Dienstgebrauch

A 65

F. 19

Deutsche Luftfahrtforschung

Forschungsbericht Nr. 1758

Tafeln zur Bestimmung des Wärmeinhalts, der adiabatischen
Endtemperatur und des adiabatischen Wärmegefälles
zwischen 0 bis 3000°

Lutz Noeggerath

Verfaßt bei

Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring, Braunschweig
Institut für Motorenforschung

6585

Zentrale für wissenschaftliches Berichtswesen
der Luftfahrtforschung des Generalluftzeugmeisters (ZWB)
Berlin-Adlershof

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstbereich des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb dieses Dienstbereichs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen.

Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstbereichs des Empfängers ist ausgeschlossen.

Der Bericht ist unter Stahlblechverschluß mit Patentschloß zu halten.

Tafeln zur Bestimmung des Wärmeinhaltes, der adiabatischen End-
temperatur und des adiabatischen Wärmegefälles

zwischen 0 bis 3000°

für ideale Gase unter Berücksichtigung der Tem-
peraturabhängigkeit der spezifischen Wärme.

Übersicht:

Auf Grund des L u t z' schen Ansatzes für die spezifische Wärme, wonach die thermischen Eigenschaften eines Gases durch die Angabe einer einzigen Konstanten hinreichend genau erfasst werden, wird eine γ, δ und τ, δ Tafel für Temperaturen bis zu 3000° entwickelt. Die mit Hilfe dieser Tafel bestimmten adiabatischen Endtemperaturen und Wärmegefälle werden in Diagrammen zusammengefaßt.

Der Bericht umfasst:

51 Seiten mit
42 Diagrammen und
1 Tafel

LUFTFAHRTFORSCHUNGSANSTALT HERMANN GÖRING
INSTITUT FÜR MOTORENFORSCHUNG

Der Institutsleiter:

E. Schmidt
(E. Schmidt)

Bearbeiter:

O. Lutz *W. Noeggerath*
(O. Lutz) (W. Noeggerath)

Braunschweig, den 31.12.1942

6587

Tafeln zur Bestimmung des Wärmeinhalts, der adiabatischen End-
temperatur und des adiabatischen Wärmegefälles

zwischen 0 bis 3000°

für ideale Gase unter Berücksichtigung der Tem-
peraturabhängigkeit der spezifischen Wärme.

I. Art, Umfang und Beschreibung der Tafeln.

Für hohe Temperaturen liegen bis jetzt noch keine die neuen Werte der spezifischen Wärme berücksichtigenden Tafeln vor, aus denen für ideale Gase die zur Berechnung thermodynamischer Prozesse benötigten Werte entnommen werden können. Auch die J, θ - Tafel von O. Lutz und F. Wolf für Luft- und Verbrennungsgase umfasst nur den Bereich bis zu 1400°.

Die hier vorgelegten Tafeln gestatten nunmehr, die thermodynamischen Werte (Wärmeinhalt, Entropie, adiabatische Endtemperatur, adiabatisches Wärmegefälle) für die meisten technisch interessierenden Gase und Gasgemische bis zu einer Temperatur von 3000° abzulesen. Es erwies sich nicht als zweckmässig, wiederum eine alle Werte umfassende J, θ - Tafel zu entwickeln, da die dabei erforderlichen graphischen Korrekturen infolge des ganz wesentlich grösseren Geltungsbereichs den Gebrauch der Tafel zu umständlich gemacht hätten. Es wurde daher eine J, θ - und eine θ, θ - Tafel entworfen, die gemeinsam verwendet werden müssen, falls die gesuchten Werte nicht genügend genau aus den daraus abgeleiteten Hilfstafeln unmittelbar abgelesen werden können.

a) J, θ und θ, θ - Tafel.

Die Tafeln umfassen einen Temperaturbereich von 0 bis 3000°; da sie für ideale Gase entworfen wurden, ist eine Abhängigkeit vom Druck nicht vorhanden. Bei ihrer Anwendung ist daher stets zu prüfen, ob die Entspannung nicht in ein Gebiet

führt, in dem die Gasgleichung nicht mehr erfüllt ist. Die Gewichtseinheit ist 1 Kmol. J und T sind als Differenzen von Nullpunkt $\theta = 0^\circ$ aus gerechnet.

Um für sämtliche Gase mit nur je 1 Tafel auszukommen, wurde der von Lutz¹⁾ für die spezifischen Wärmen idealer Gase vorgeschlagene Ansatz

$$I_p = f_1(\theta) + \beta \cdot f_2(\theta)$$

verwendet, wonach $f_1(\theta)$ und $f_2(\theta)$ empirisch bestimmte, für alle Gase gleiche Funktionen sind und β eine das spezielle Gas kennzeichnende Konstante ist. $f_1(\theta)$ und $f_2(\theta)$ werden dabei aus dem gegebenen Verlauf der spezifischen Wärme so ermittelt, dass β für Luft = 1 und für ein Normal-Verbrennungsgas (Verbrennungsgas aus einem Kohlenwasserstoff mit 0,85 GT Kohlenstoff und 0,15 GT Wasserstoff ohne Luftüberschuss, ohne Berücksichtigung der Dissoziation) = 1,5 wird. Für Gemische ist $\beta = \frac{\sum n_i \beta_i}{\sum n_i}$, falls mit n_i die Molzahl und mit β_i die Kennzahl der Einzelkomponenten bezeichnet wird.

Die danach bestimmten J, θ - und T, θ - Tafeln sind zur Erleichterung des Gebrauchs in dasselbe Koordinatensystem eingezeichnet. Beide Tafeln umfassen den Bereich von $0 < \theta < 3000^\circ$ und $0,7 < \beta < 5$; weiterhin lassen sich die Werte für H_2 , N_2 , CO , NO , O_2 , H_2O , CO_2 und NH_3 unmittelbar entnehmen. Mit Hilfe der eingezeichneten Linie $A.R.\theta$ kann auch die innere Energie abgelesen werden.

In der links oben befindlichen Hilfstafel sind die Kennzahlen β für die meisten technisch interessierenden Gase eingetragen. Eine daneben angebrachte Zahlentafel enthält die in den Bereichen von 200 bis 3000° und 200 bis 1000° , 1000 bis 2000° , 2000 bis 3000° mittleren β -Werte, die so bestimmt wurden, dass die grössten positiven und negativen Fehler der daraus bestimmten Wärmeinhalte im angegebenen Bereich absolut gleich gross werden. In die gleiche Hilfstafel ist die "iden-

¹⁾ O. Lutz u. F. Wolf: J, θ -Tafel für Luft und Verbrennungsgase. Berlin 1938.

tische Entropie-Differenz" ΔT in zwei verschiedenen Maßstäben über dem Entspannungsverhältnis aufgetragen, mit deren Hilfe aus dem T, β - Diagramm die adiabatische Endtemperatur bei gegebenem Druckverhältnis unmittelbar, bei gegebenem Volumenverhältnis unter Benutzung der ebenfalls graphisch gegebenen Funktion $A, \beta \ln T/273$ bestimmt werden kann.

Endlich sind in der Tafel drei schematische Anwendungsbeispiele angeführt.

b) Hilfstafeln zur Bestimmung der adiabatischen Endtemperatur und des adiabatischen Wärmegefälles.

Mit Hilfe der γ, β - und T, β - Tafeln wurden zahlreiche Hilfstafeln gezeichnet, aus denen für Temperaturen bis 3000° , Kennzahlen der spezifischen Wärme von $1 < \beta < 4,2$ und Druckverhältnissen der Entspannung von $5 < \beta < 350$ die adiabatische Endtemperatur und das adiabatische Wärmegefälle unmittelbar entnommen werden können. Die Auftragung erfolgte mit der Anfangstemperatur als Parameter jeweils für gleichbleibendes β über dem Druckverhältnis und für gleichbleibendes Druckverhältnis über β . Die Zusammenstellung wurde durch eine γ, β - und η, β - Tafel ergänzt, die besonders bequem zur Bestimmung der Reaktionstemperatur der Verbrennung bei konstantem Druck bzw. konstantem Volumen sind.

II. Anwendung der Tafeln; Grundgleichungen.

Vor jeglicher Anwendung ist zunächst die Kennzahl β zu bestimmen. In den meisten Fällen werden die aus der Zahlentafel entnommenen Mittelwerte ausreichen. Nur für sehr genaue Berechnungen muss der wahre Wert von β bestimmt werden.

a) Bestimmung des Wärmeinhaltes γ und der inneren Energie η .

$$\gamma = \int_1^2 c_p d\theta;$$

$$\eta = \int_1^2 c_v d\theta.$$

Wie in dem in dem freien Feld der γ, β -Tafel eingezeichneten Anwendungsbeispiel gezeigt, kann der γ, β -Tafel der Wärmehalt unmittelbar über der Abszisse, die innere Energie über der Geraden $A \cdot R \cdot \beta$ abgelesen werden.

b) Bestimmung der Reaktionsendtemperatur.

$$\gamma_r = \gamma_1 + q_r$$

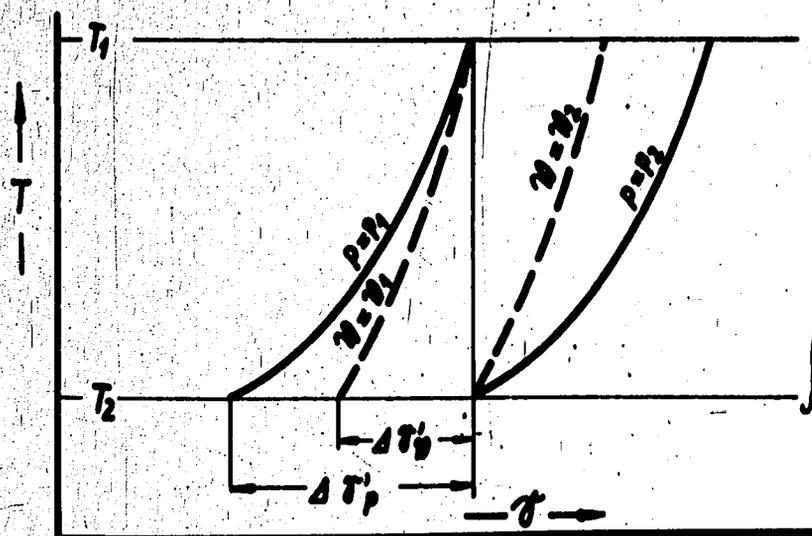
Für genaue Rechnungen ist die Endtemperatur erst zu schätzen und dann für den daraus für das betreffende Gasgemisch bestimmten β -Wert abzulesen, was bis zur Übereinstimmung zu wiederholen ist.

Die Anwendung der Tafel ist in dem Anwendungsbeispiel erläutert.

c) Bestimmung der adiabatischen Endtemperatur.

Die Bestimmung geht von folgender Überlegung aus:

Aus dem T, γ - Diagramm (vergl. nebenstehende Skizze) ergibt sich, dass bei adiabatischer Zustandsänderung die Endtemperatur aus der durch den Anfangspunkt gehenden Linie $p = \text{const.}$ (bei gegebenem Druckverhältnis) bzw. $\nu = \text{const.}$ (bei gegebenem Volumenverhältnis) nach Bestimmung der "identischen Entropiedifferenz" $\Delta S'$ gemäss



bei gegebenem
Druckverhältnis

$$\int \frac{L_p dI}{T} = \Delta S'_p = A R \ln \frac{p_1}{p_2}$$

beziehungsweise

$$\int \frac{L_\nu dI}{T} = \Delta S'_\nu = A R \ln \frac{\nu_2}{\nu_1}$$

bei gegebenem
Volumenverhältnis

unmittelbar zu entnehmen ist.

Man bestimmt also in der Hilfstafel das dem gegebenen Entspannungsverhältnis zugehörige ΔT , woraus, wie in dem Anwendungsbeispiel gezeigt, bei gegebenem Druckverhältnis die Endtemperatur aus der T, β - Tafel unmittelbar abgelesen werden kann. Ist das Volumenverhältnis gegeben, so wird die im 3. Anwendungsbeispiel gegebene Konstruktion mit Hilfe der graphisch gegebenen Funktion $A.R \ln T/273$ verständlich, falls man berücksichtigt, dass

$$\begin{aligned} \int_1^2 \frac{L_p dT}{T} &= \int_1^2 \frac{L_v dT}{T} + A.R \int_1^2 \frac{dT}{T} \\ &= \int_1^2 \frac{L_v dT}{T} + A.R \left(\ln \frac{T_1}{273} - \ln \frac{T_2}{273} \right) \end{aligned}$$

gilt.

Ist nicht die Entspannungs-, sondern die Verdichtungsendtemperatur gegeben, so sind die beschriebenen Verfahren unzukehrbar.

Für die Berechnung ist die Endtemperatur θ_2 zu schätzen, daraus β_2 zu bestimmen und die Berechnung mit dem arithmetischen Mittel aus den β -Werten für Anfangs- und Endtemperatur durchzuführen, bis Übereinstimmung erzielt ist.

d) Bestimmung des adiabatischen Wärmegefälles.

$$h_{od} = J_1 - J_2 = \int_1^2 L_p d\beta$$

Man bestimmt demnach gemäss c) mit Hilfe der T, β - Tafel die Endtemperatur und daraus mit Hilfe der J, β - Tafel die Differenz der zugehörigen Wärmeinhalte.

e) Benutzung der Hilfstafeln zur Bestimmung der adiabatischen Endtemperatur und des adiabatischen Wärmegefälles.

Die Intervalle zwischen den einzelnen Tafeln wurden so gewählt, dass Zwischenwerte linear interpoliert werden können.

III. Bemerkungen zur Berechnung der Tafeln.

Den Berechnungen wurden die von Justi²⁾ gegebenen Werte der spezifischen Wärme zwischen 0 und 3000° zugrunde gelegt. Gemäss der getroffenen Annahme, dass β für Luft = 1 und für das Normalverbrennungsgas = 1,5 ist, lassen sich die beiden Temperaturfunktionen nach

$$f_1(\theta) = 3\ell_{p_L} - 2\ell_{p_N} \quad \text{und}$$

$$f_2(\theta) = 2.(\ell_{p_N} - \ell_{p_L})$$

aus dem Verlauf der spezifischen Wärme der Luft ℓ_{p_L} und der spezifischen Wärme des Normalverbrennungsgases ℓ_{p_N} berechnen. Dabei wurde die Zusammensetzung der Luft wie folgt angenommen:

$$r_{N_2} = 0,7803, \quad r_{O_2} = 0,2099, \quad r_{H_2} = 0,0001, \quad r_{CO_2} = 0,0003,$$

$$\text{Argon + übrige Edelgase } r = 0,00935;$$

der Unterschied zwischen den daraus bestimmten und den von Justi bis 2000° angegebenen Werten für ℓ_{p_L} liegt in der Größenordnung eines %.

2) E. Justi: Spez. Wärme, Enthalpie, Entropie und Dissoziation technischer Gase. Berlin, 38.

Wärmeinhalt und Entropie wurden durch graphische Integration der $f_1(\theta)$ und $f_2(\theta)$ - Linien gewonnen.

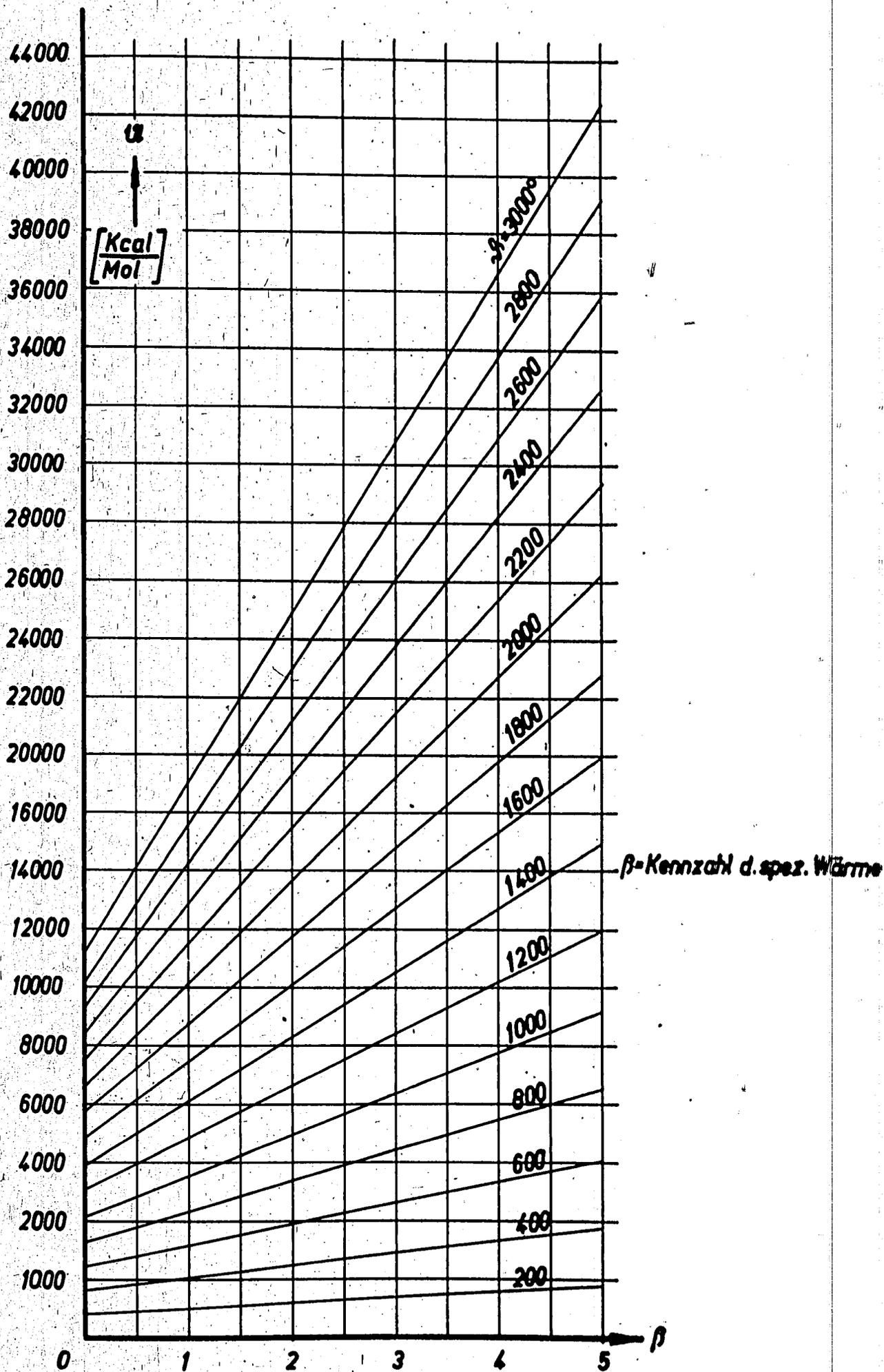
β wurde aus dem wahren Verlauf des Wärmeinhalts gemäss

$$\beta = \frac{v - \int f_1(\theta) d\theta}{\int f_2(\theta) d\theta}$$

bestimmt.

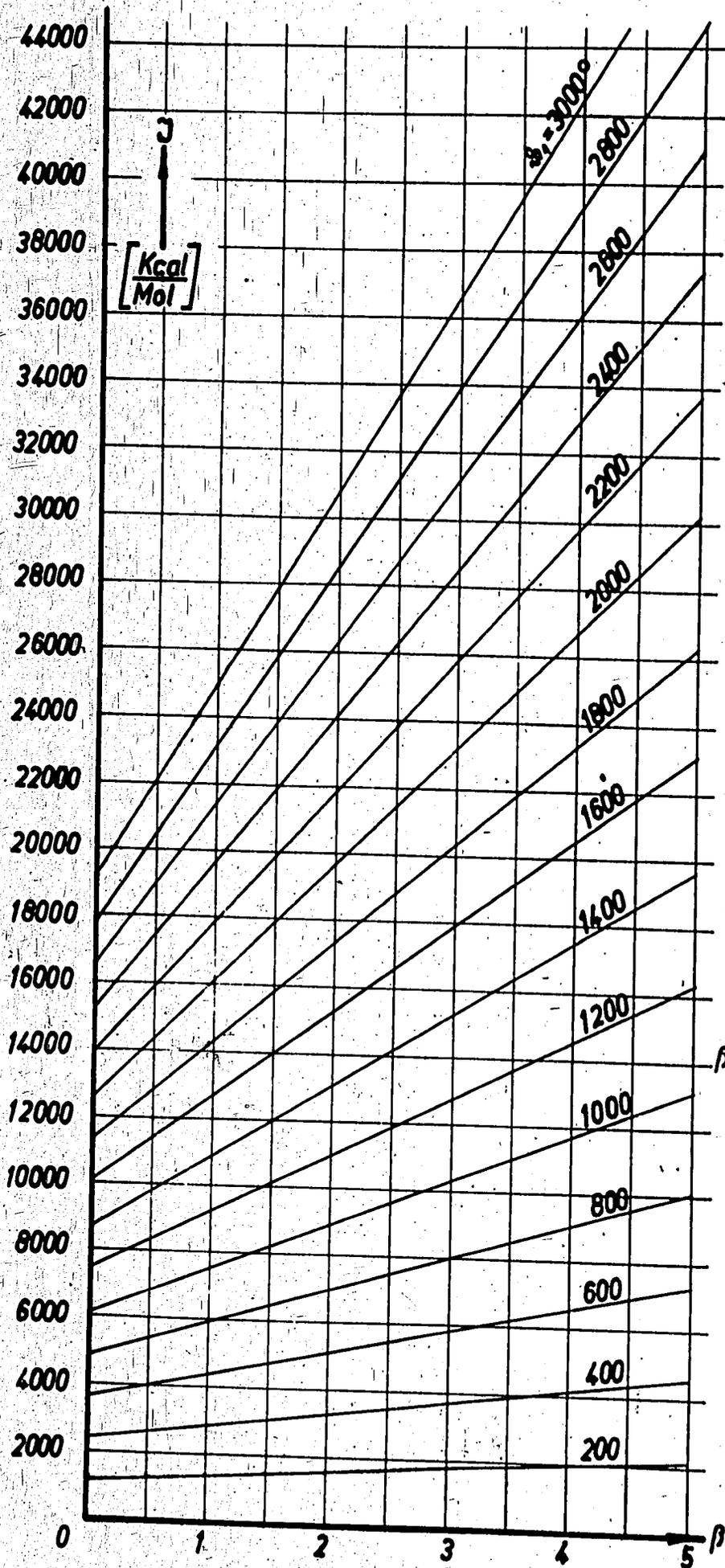
Bei der Berechnung der Hilfstafeln wurde die zur Bestimmung der adiabatischen Endtemperatur benötigte "identische Entropiedifferenz ΔT " von Fall zu Fall berechnet. Sämtliche Werte wurden graphisch gegeneinander ausgeglichen.

Thermodynamische Hilfsstafeln.



Innere Energie U
in Abhängigkeit von β und a .

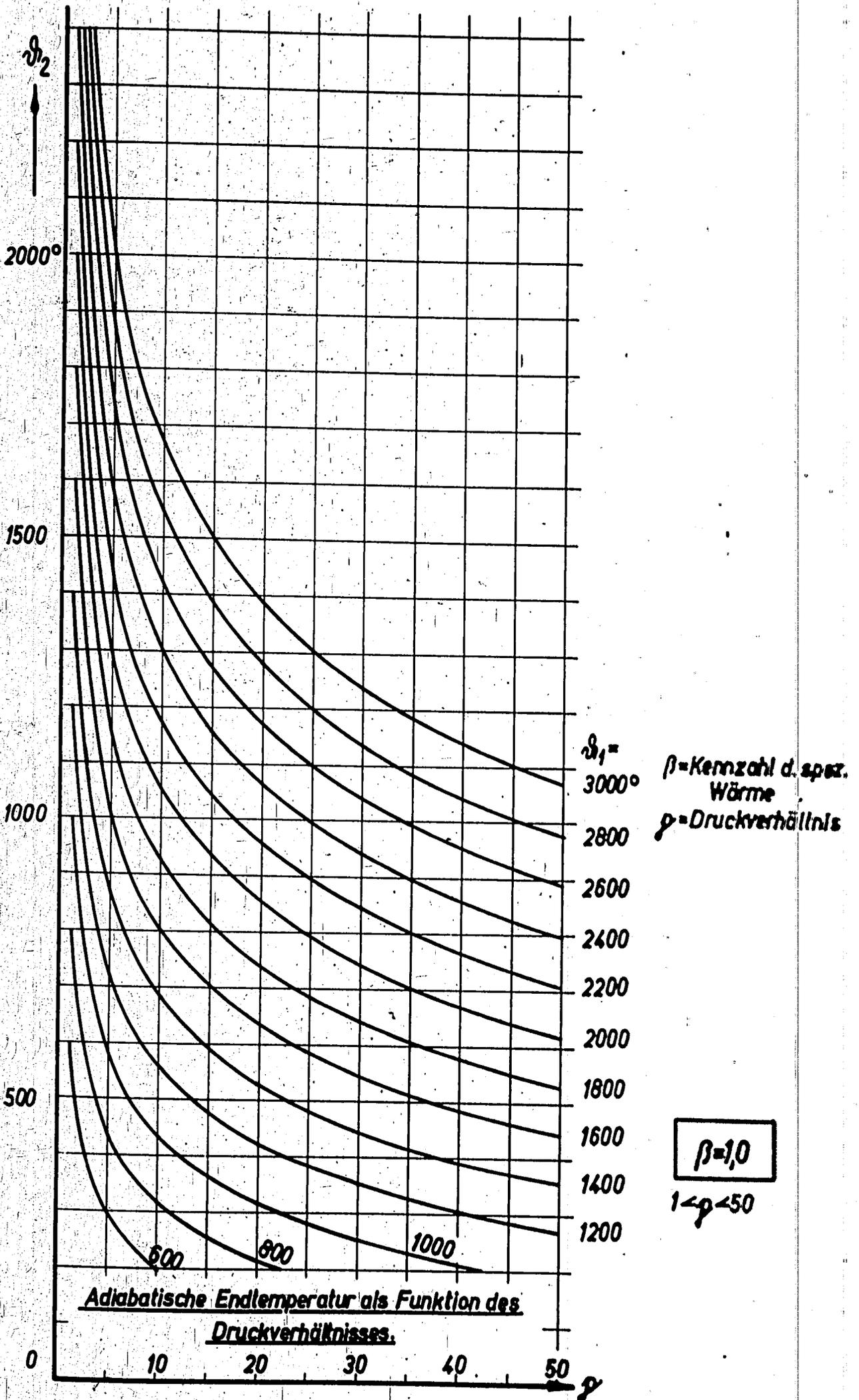
Thermodynamische Hilfstafeln



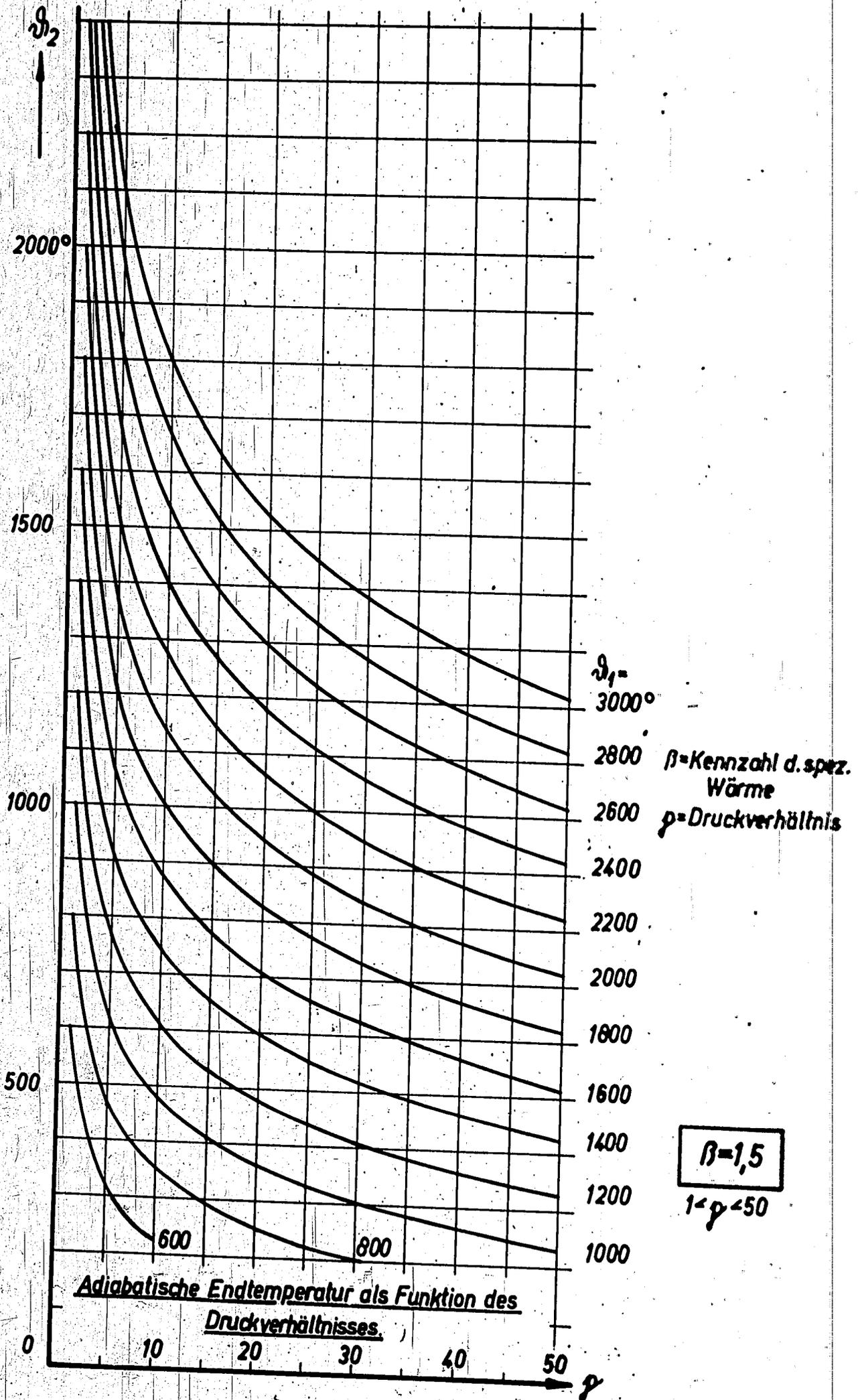
β -Kennzahl d. spez. Wärme

Wärmeinhalt J
in Abhängigkeit von β und θ

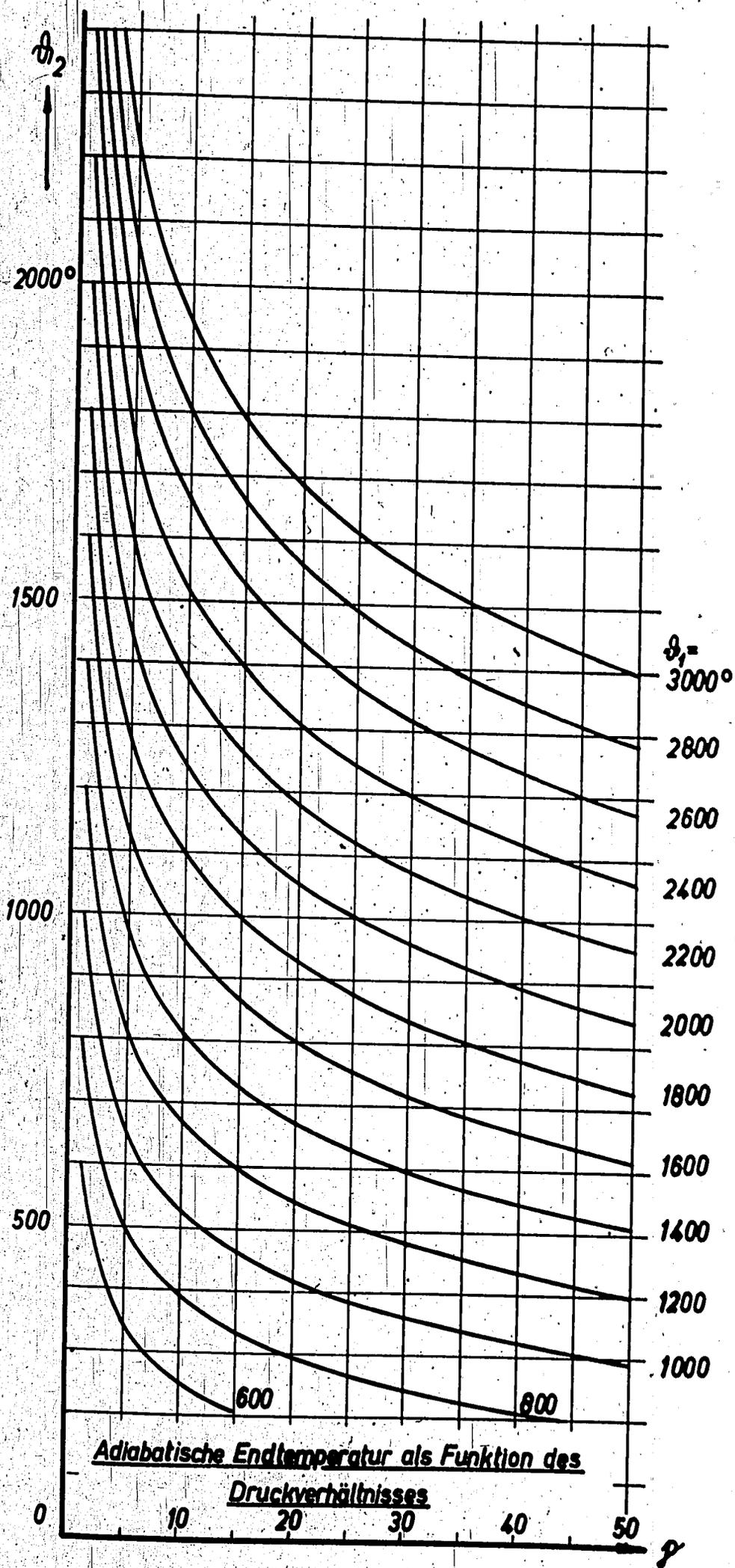
Thermodynamische Hilfstafeln



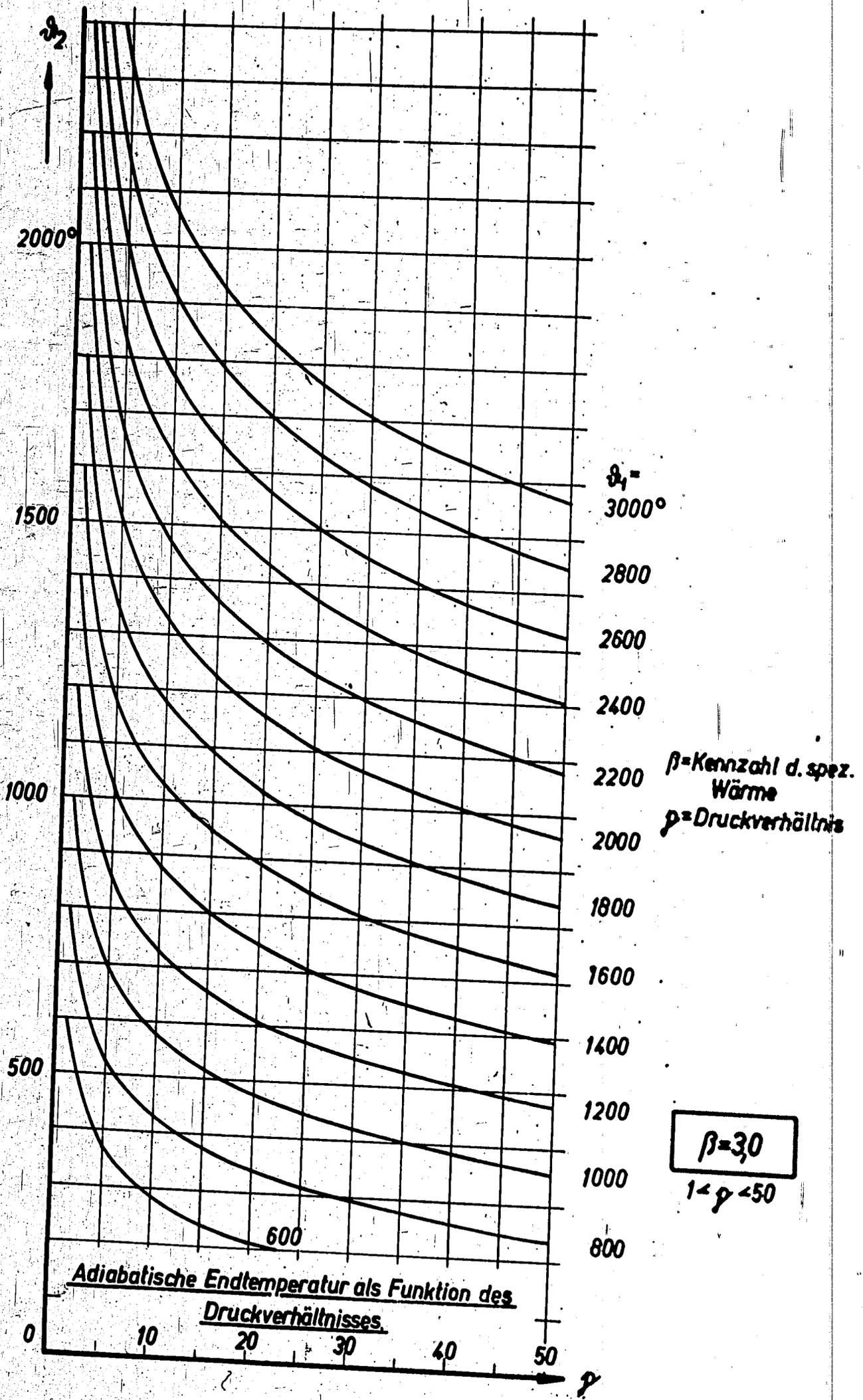
Thermodynamische Hilfstafeln



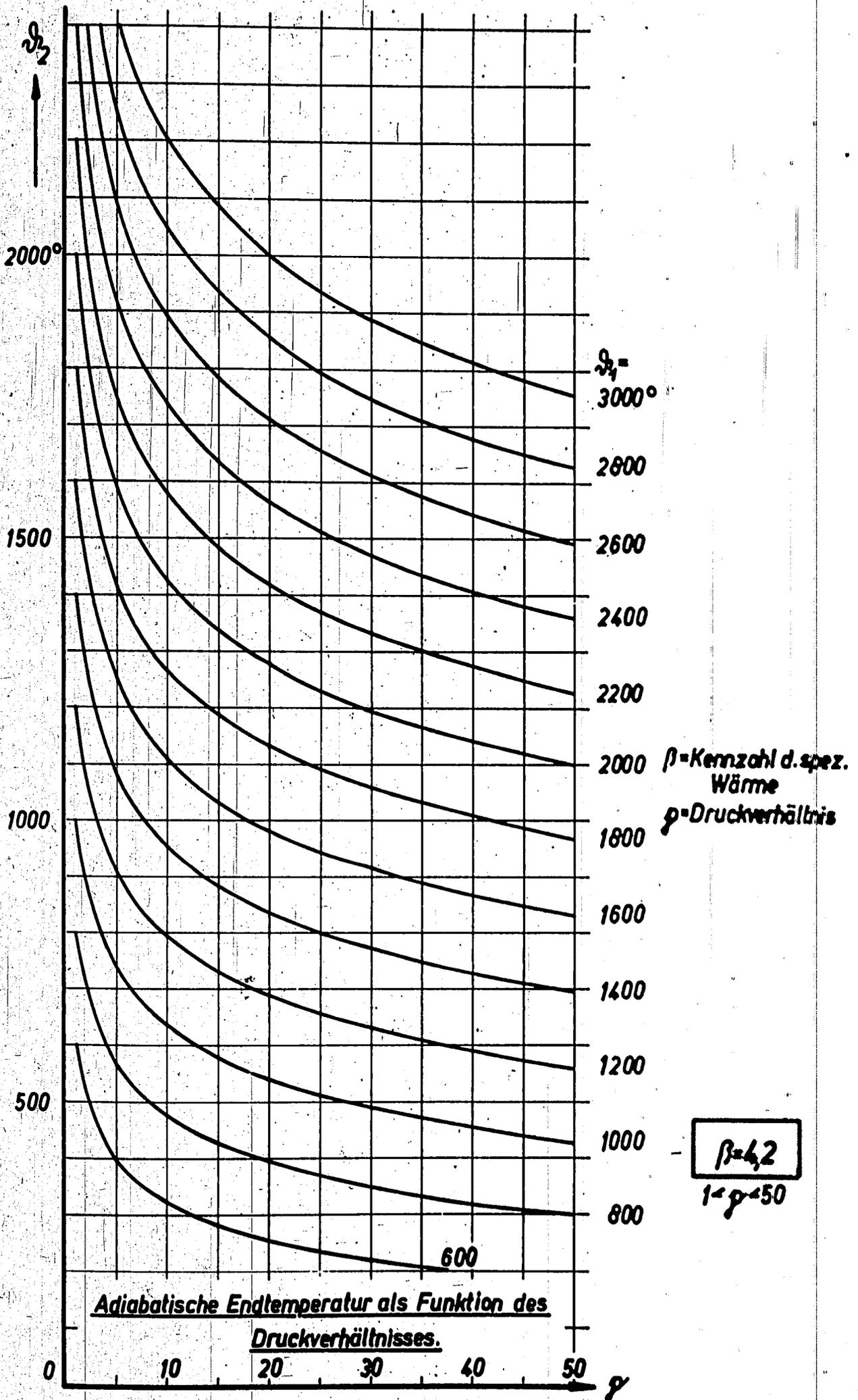
Thermodynamische Hilfstafeln



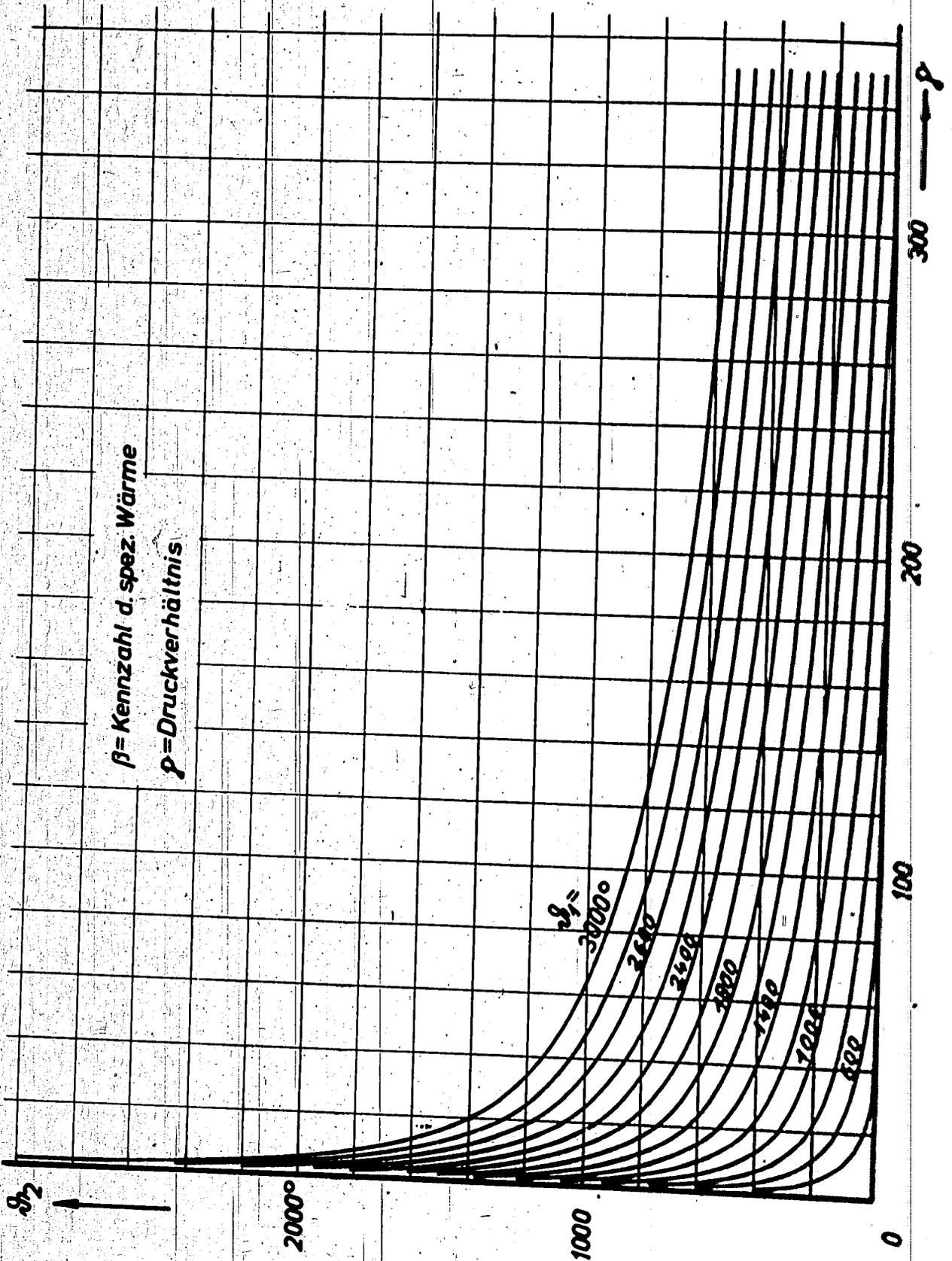
Thermodynamische Hilfstafeln



Thermodynamische Hilfstafeln



Thermodynamische Hilfstafeln



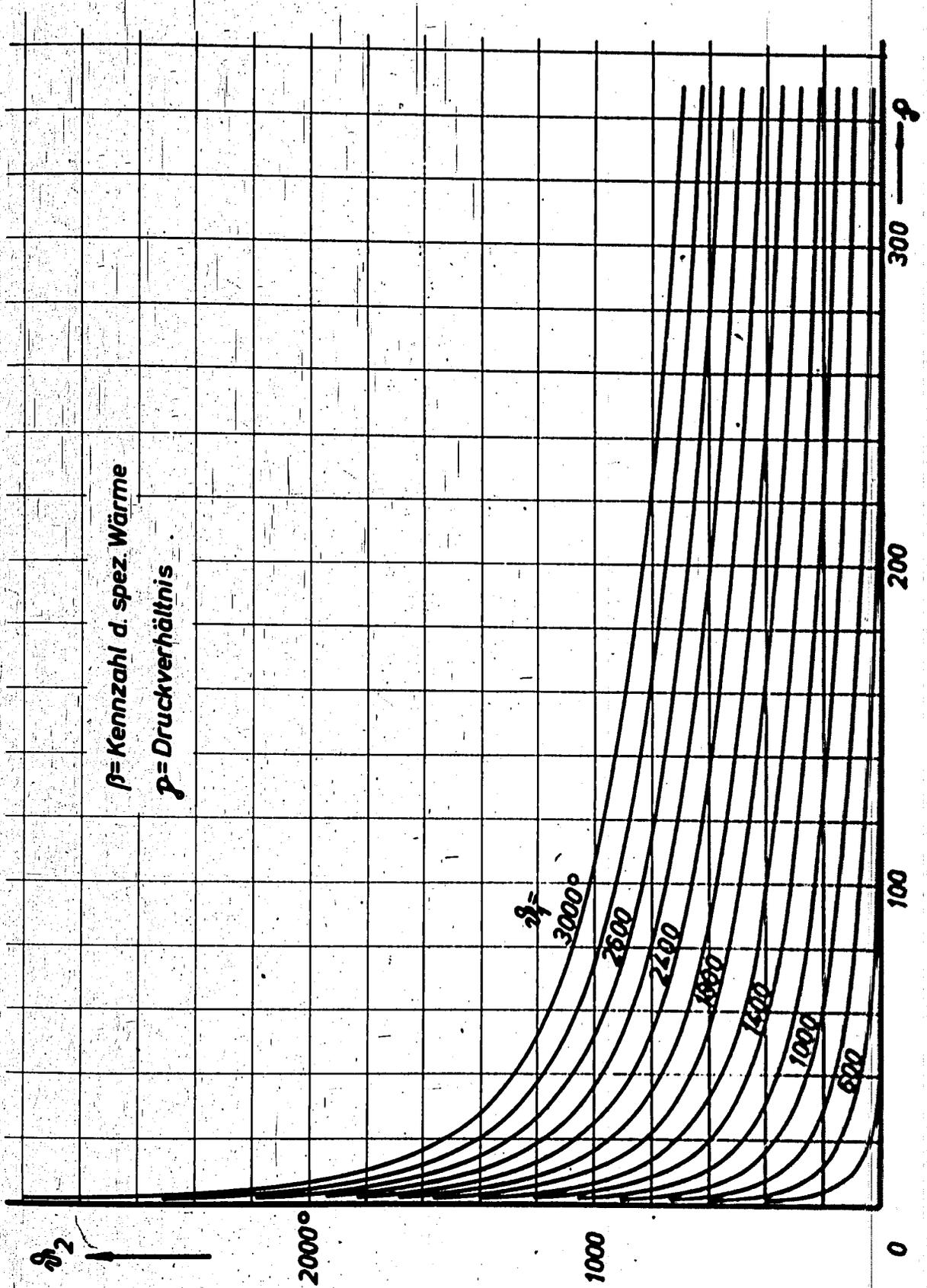
Adiabatische Endtemperatur als Funktion

des Druckverhältnisses.

$\beta = 1,0$

$1 < p < 350$

Thermodynamische Hilfstafeln



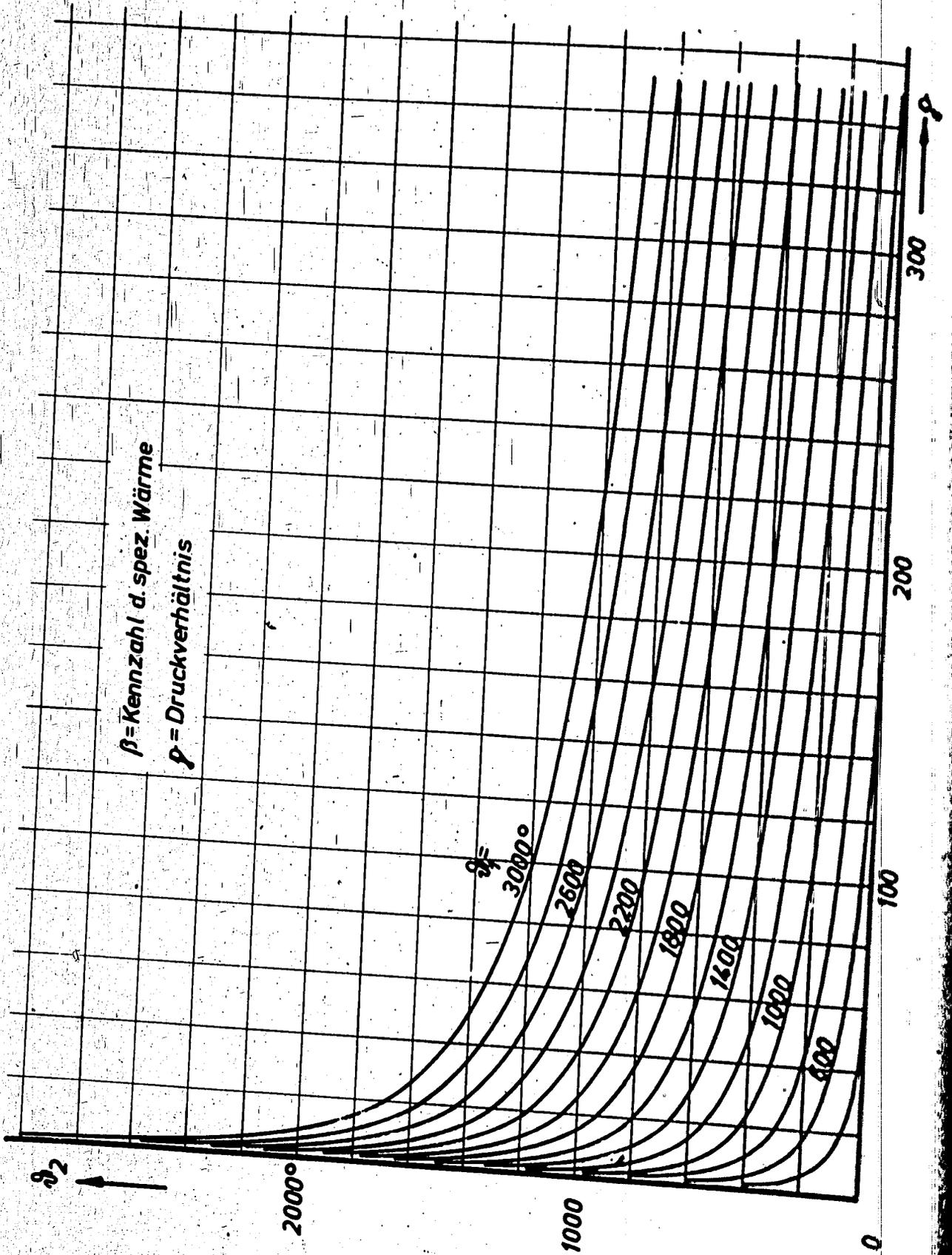
Adiabatische Endtemperatur als Funktion

des Druckverhältnisses.

$\beta = 1,5$

$1 < \gamma < 3,50$

Thermodynamische Hilfstafeln

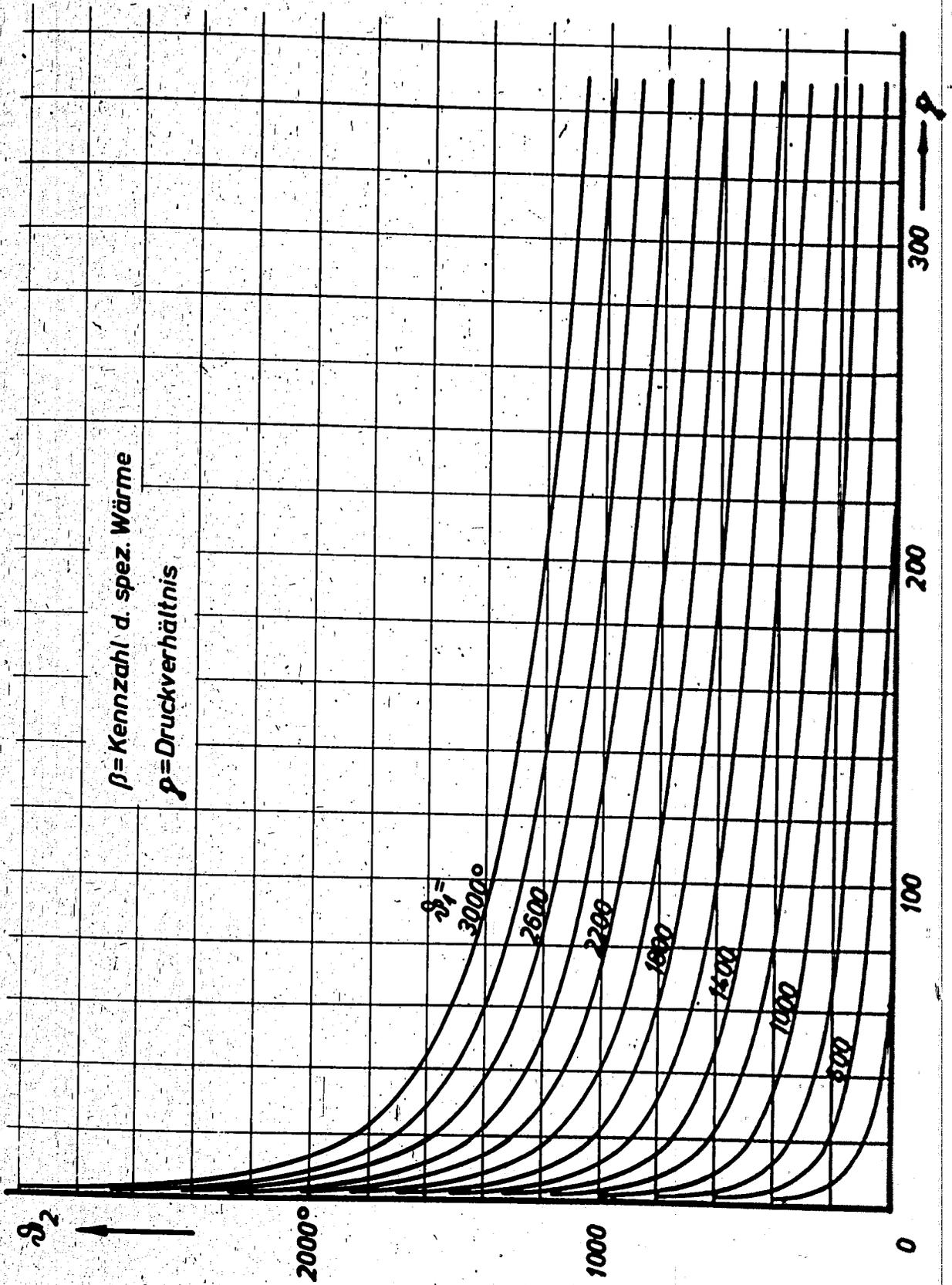


Adiabatische Endtemperatur als Funktion
des Druckverhältnisses.

$\beta = 22$
 $1 < \rho < 350$

b 604

Thermodynamische Hilfstafeln

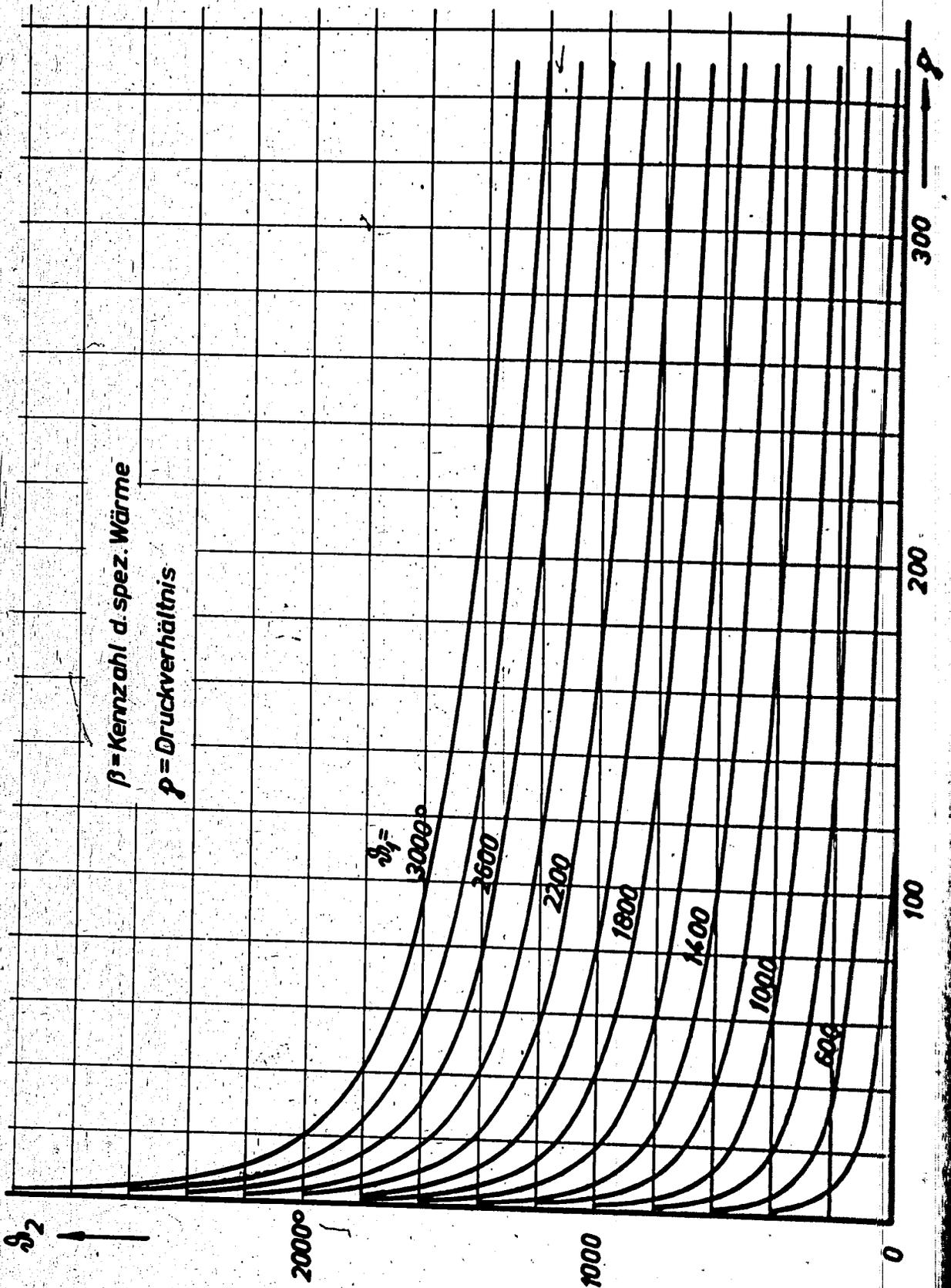


Adiabatische Endtemperatur als Funktion

des Druckverhältnisses.

$\beta = 30$
 $1 < \rho < 350$

Thermodynamische Hilfstafeln

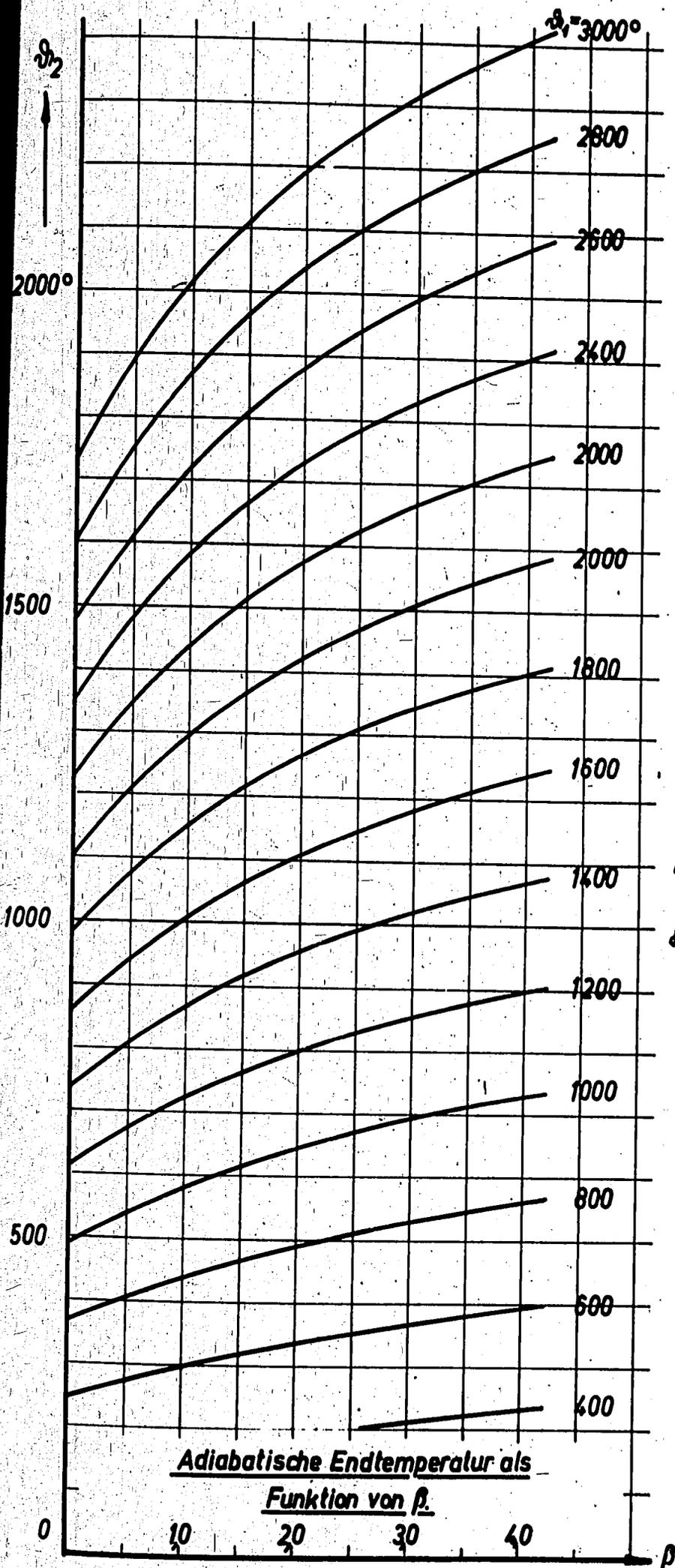


Adiabatische Endtemperatur als Funktion

des Druckverhältnisses.

$\beta = 4,2$
 $1 < \rho < 350$

Thermodynamische Hilfstafeln

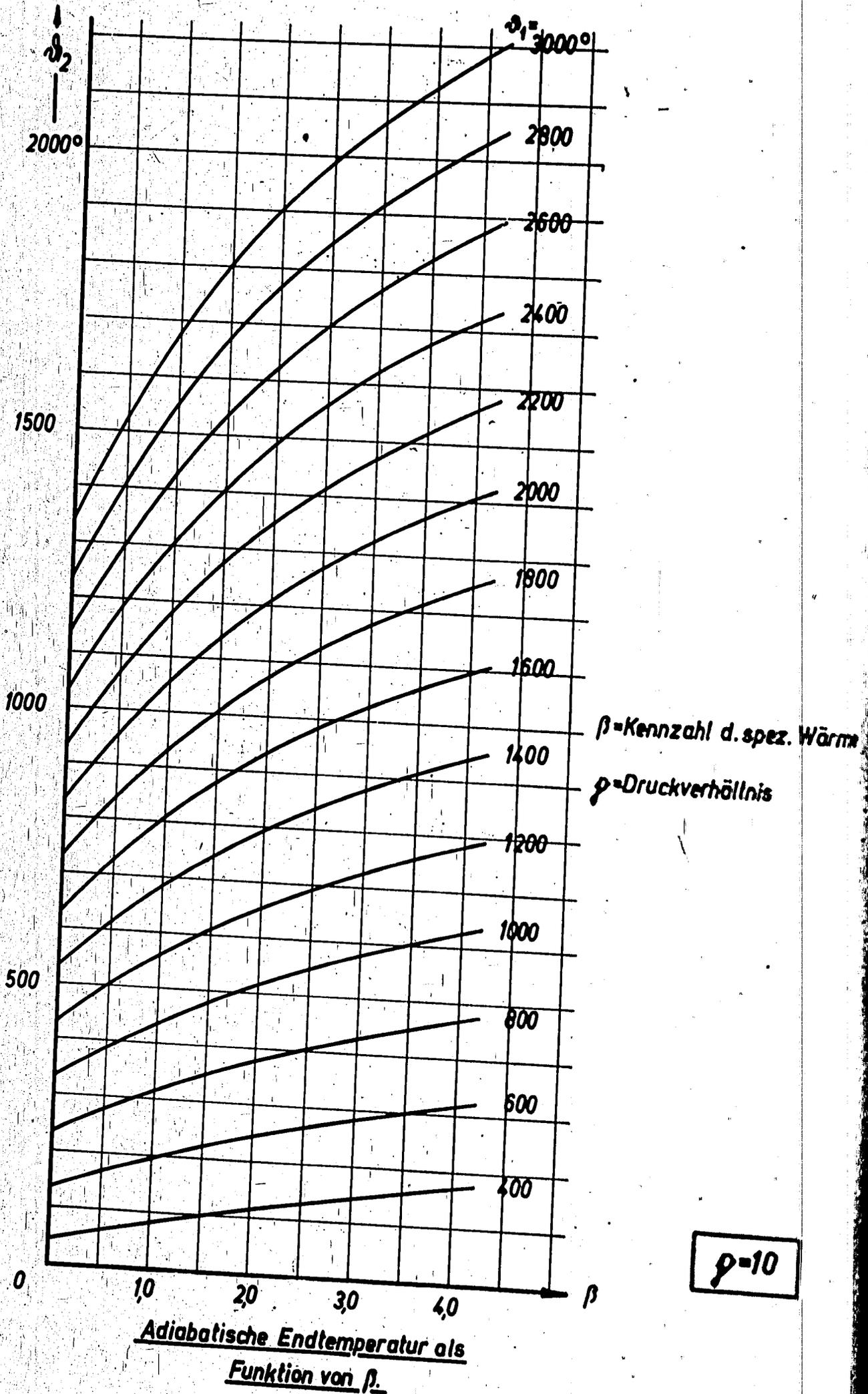


β = Kennzahl d. spez. Wärme
 p = Druckverhältnis

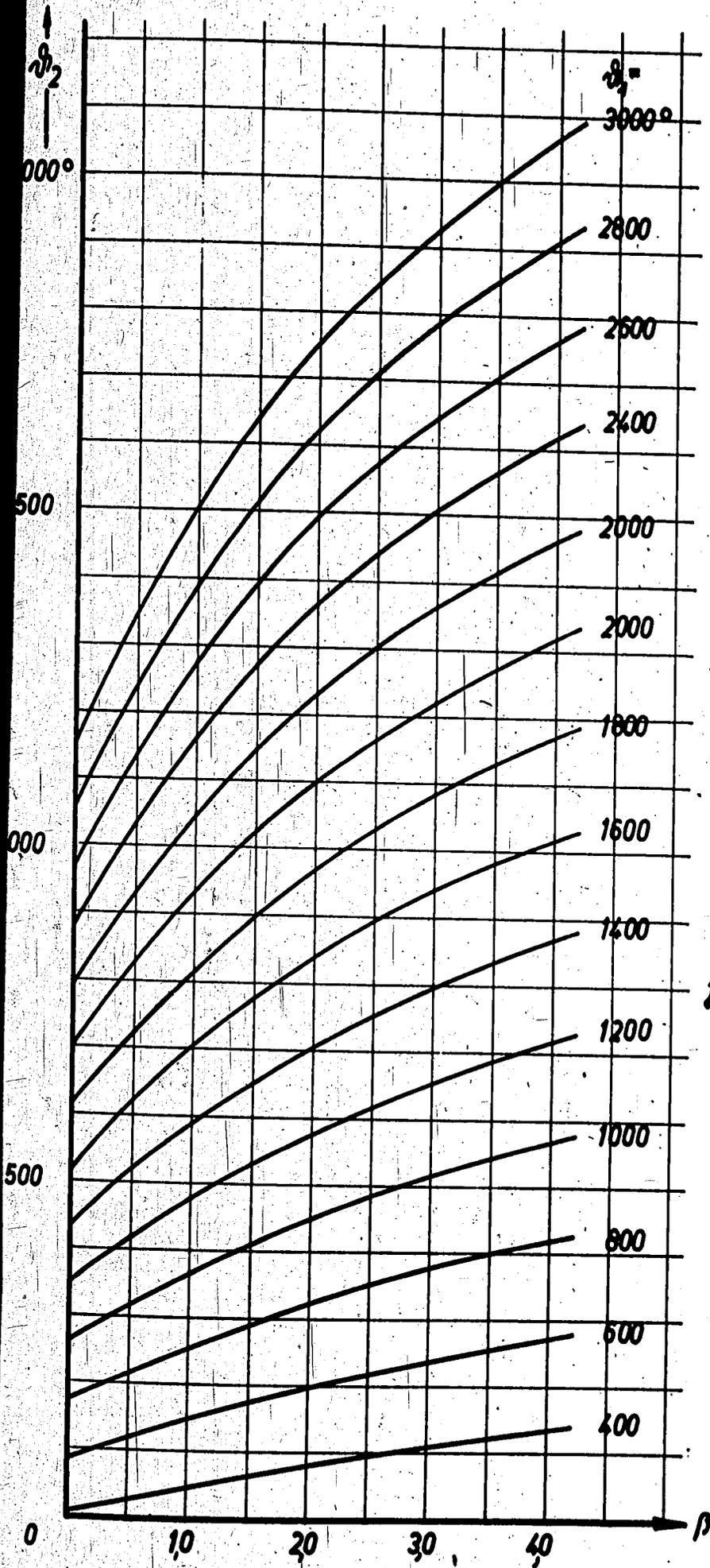
Adiabatische Endtemperatur als Funktion von β .

$p=5$

Thermodynamische Hilfstafeln



Thermodynamische Hilfstafeln



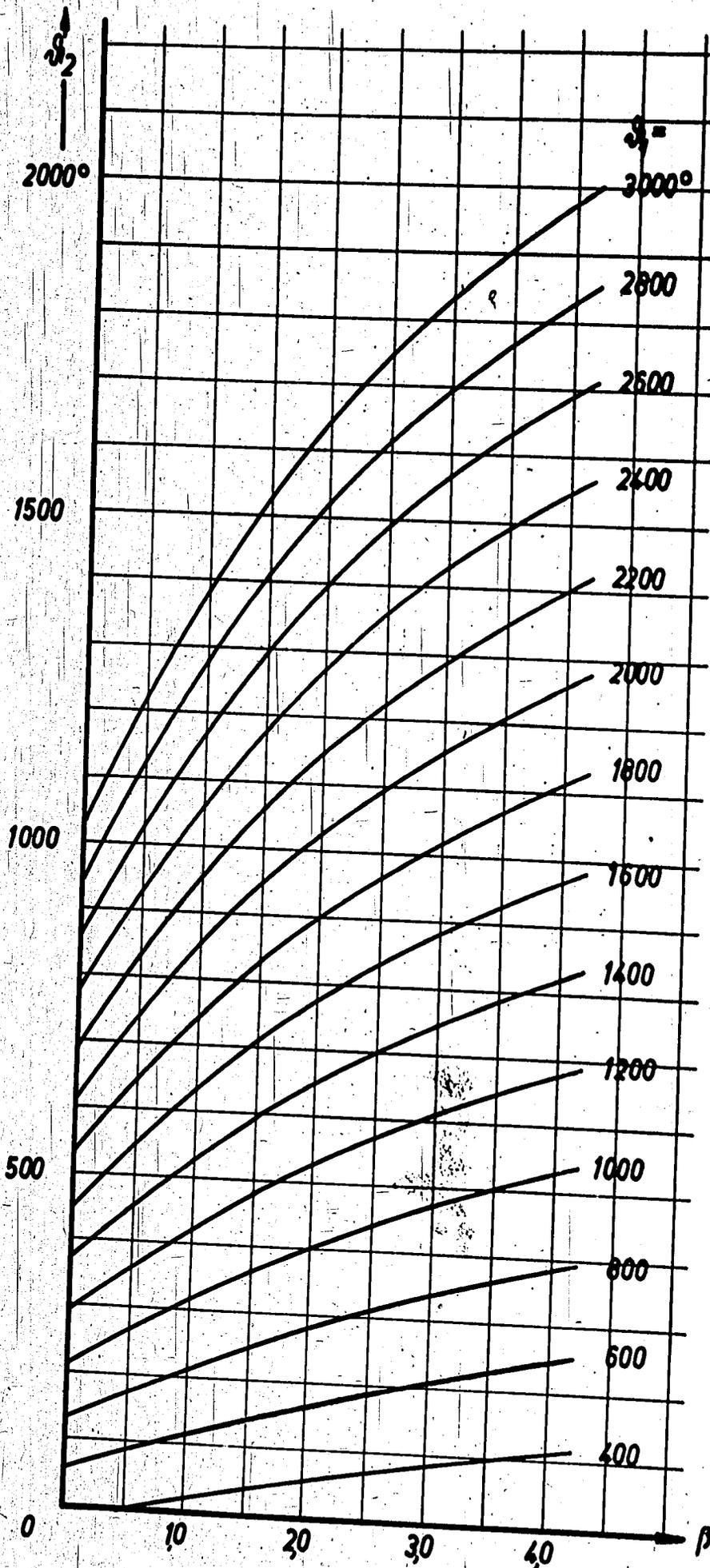
β = Kennzahl d. spez. Wärme

ρ = Druckverhältnis

$\rho = 15$

Adiabatische Endtemperatur als Funktion von β .

Thermodynamische Hilfstafeln

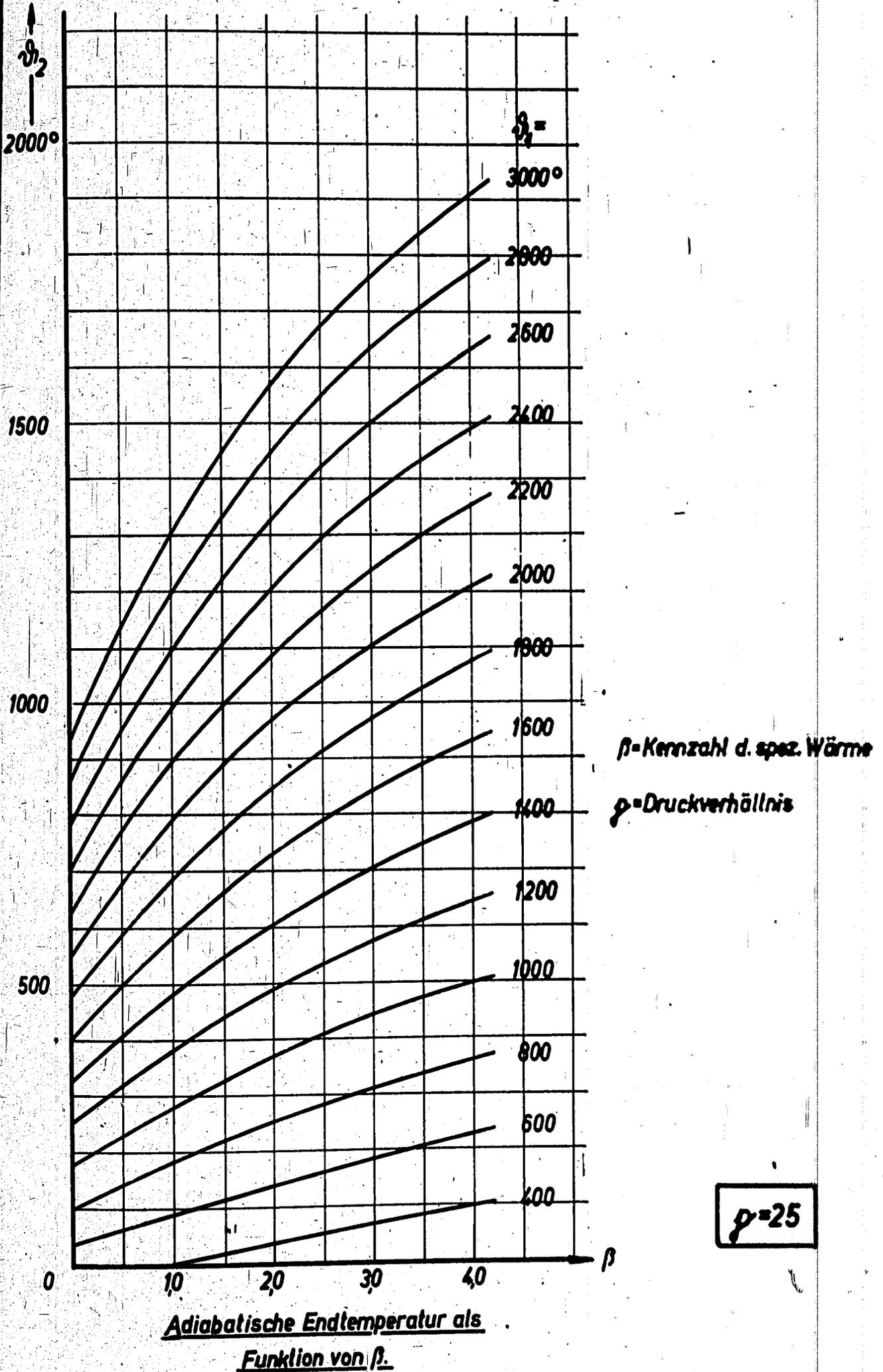


β = Kennzahl d. spez. Wärme
 ρ = Druckverhältnis

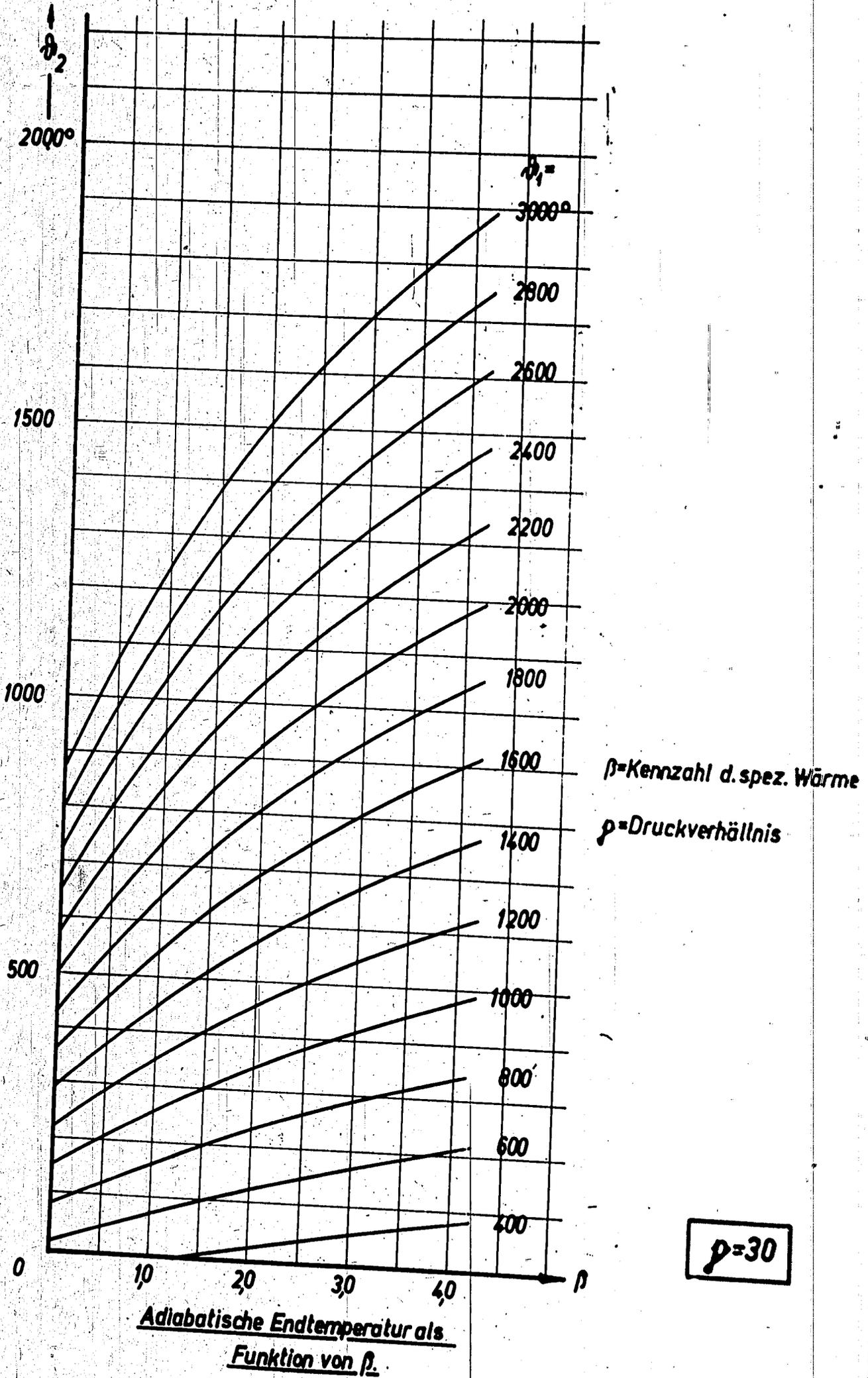
$\rho = 20$

Adiabatische Endtemperatur als Funktion von β .

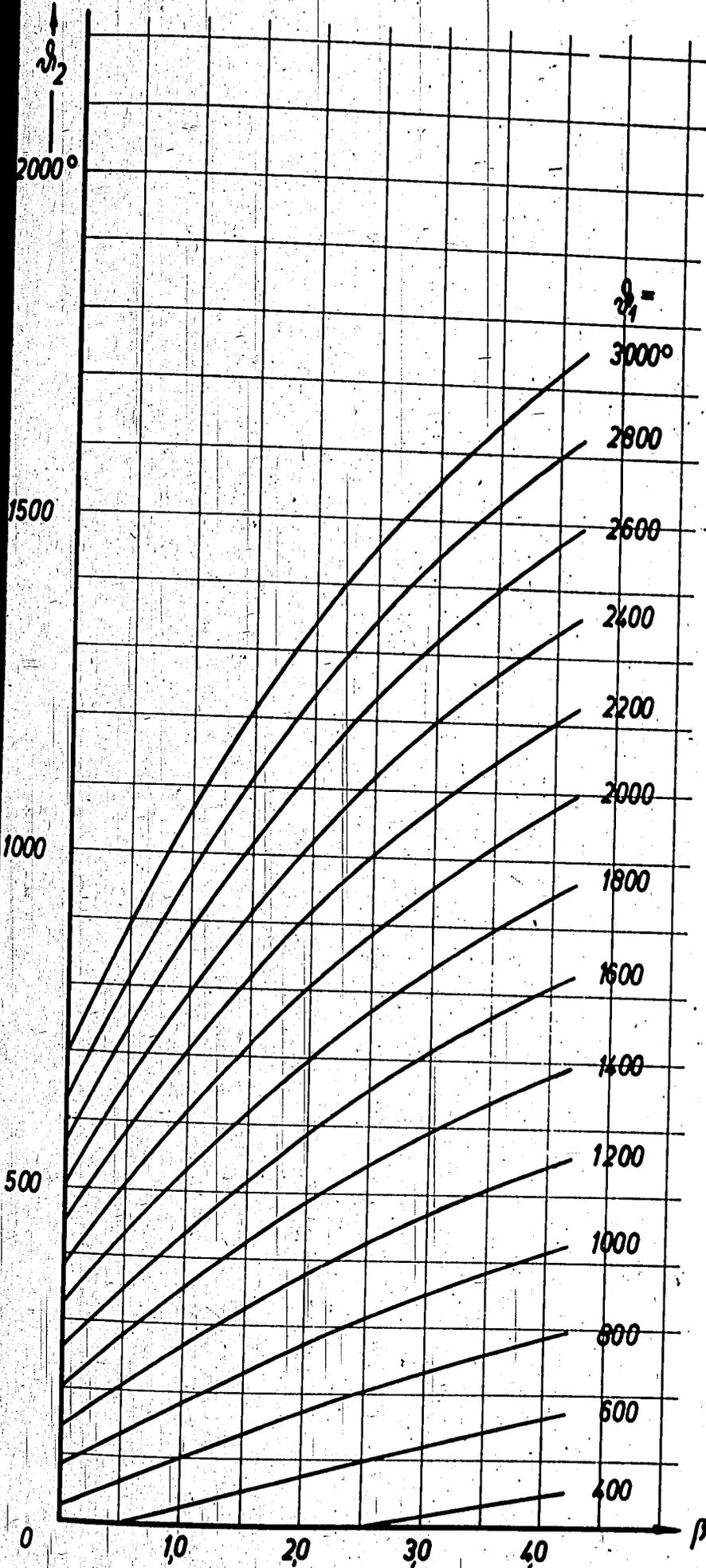
Thermodynamische Hilfstafeln



Thermodynamische Hilfstafeln



Thermodynamische Hilfstafeln



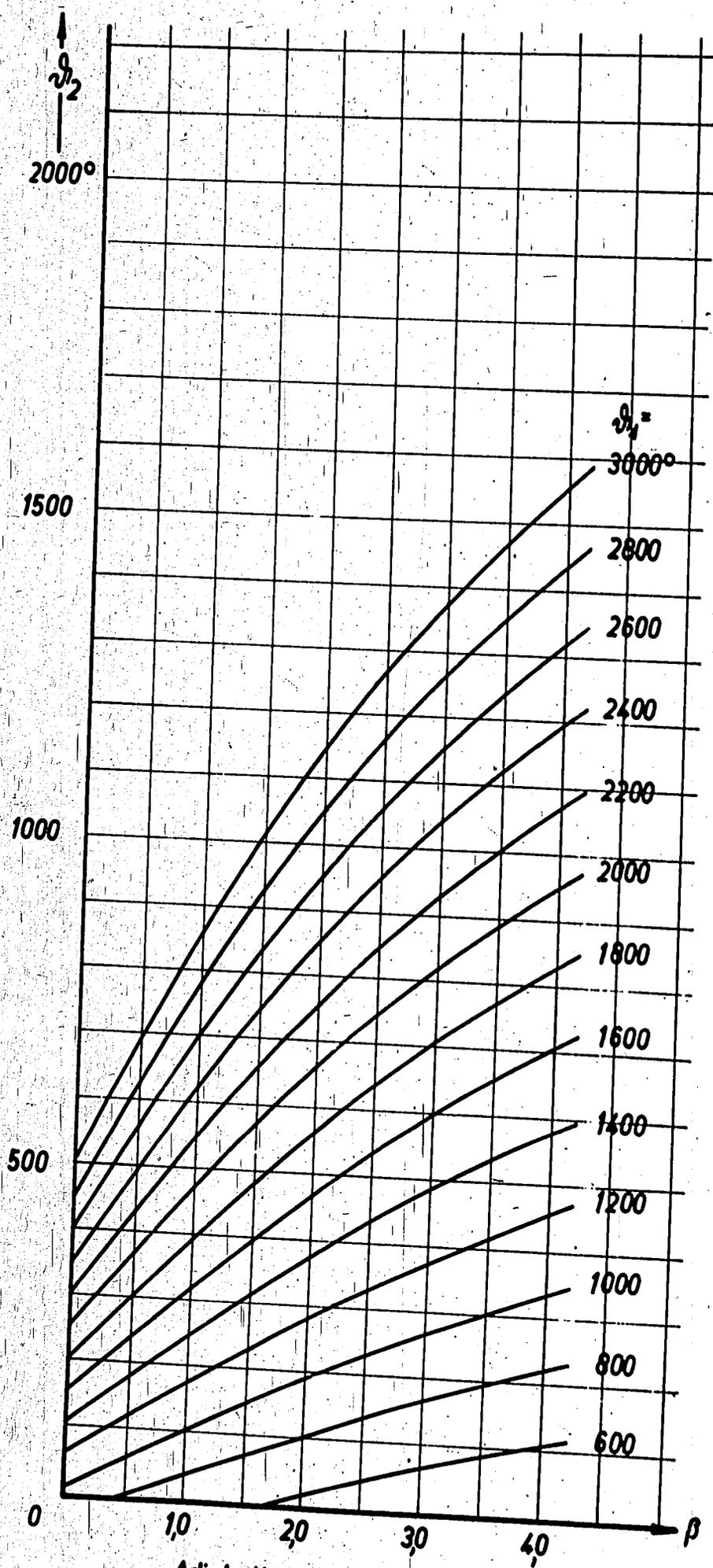
β = Kennzahl d. spez. Wärme

p = Druckverhältnis

$p=50$

Adiabatische Endtemperatur als
Funktion von β .

Thermodynamische Hilfstafeln

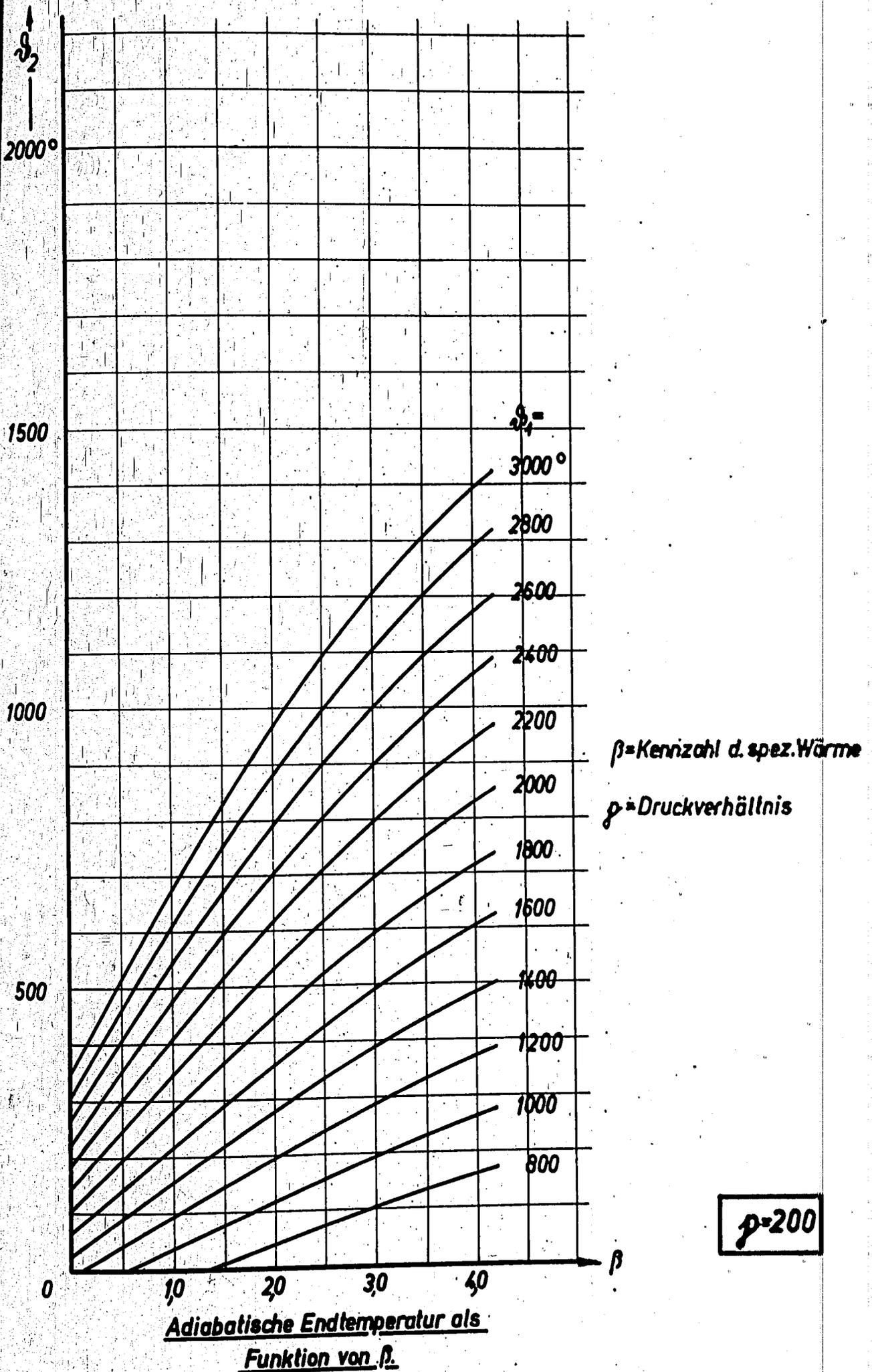


β = Kennzahl d. spez. Wärme
 ρ = Druckverhältnis

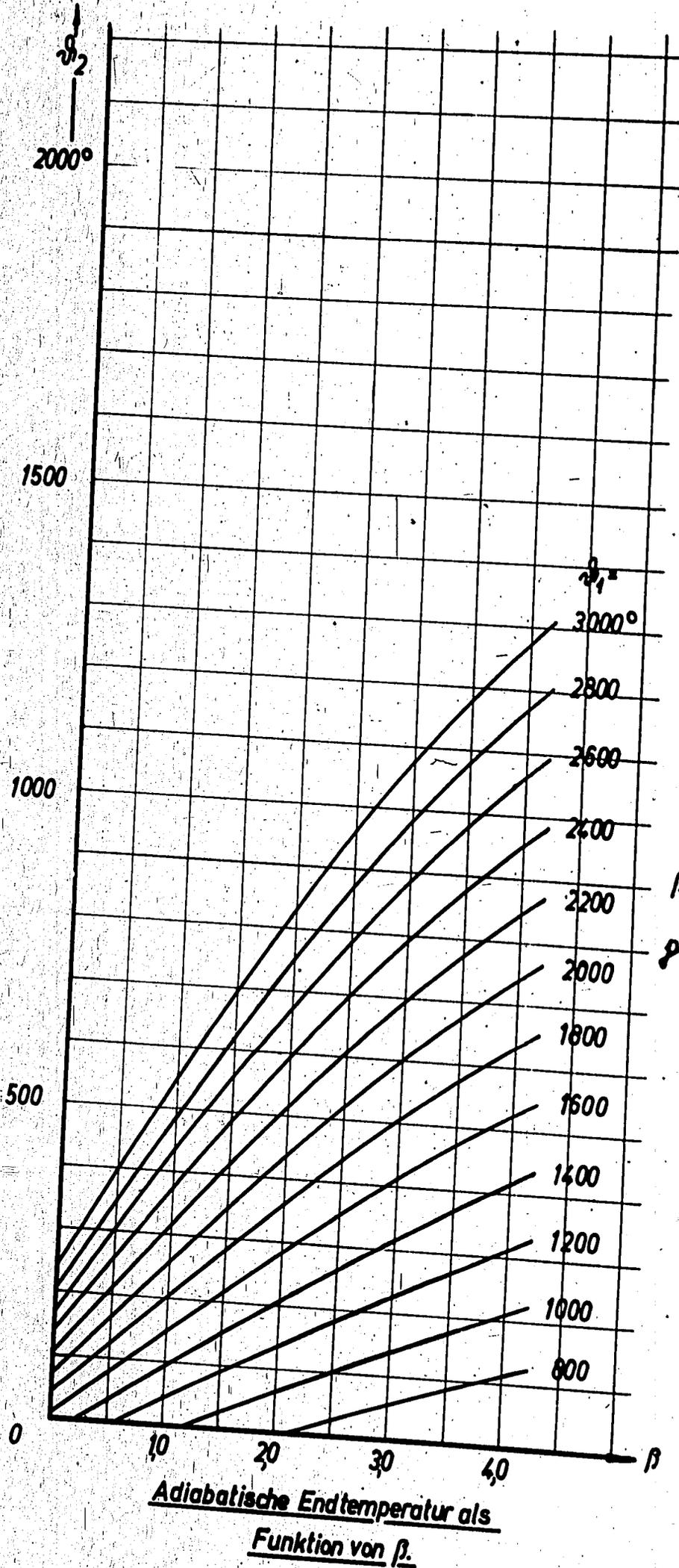
$\rho = 100$

Adiabatische Endtemperatur als Funktion von β .

Thermodynamische Hilfstafeln



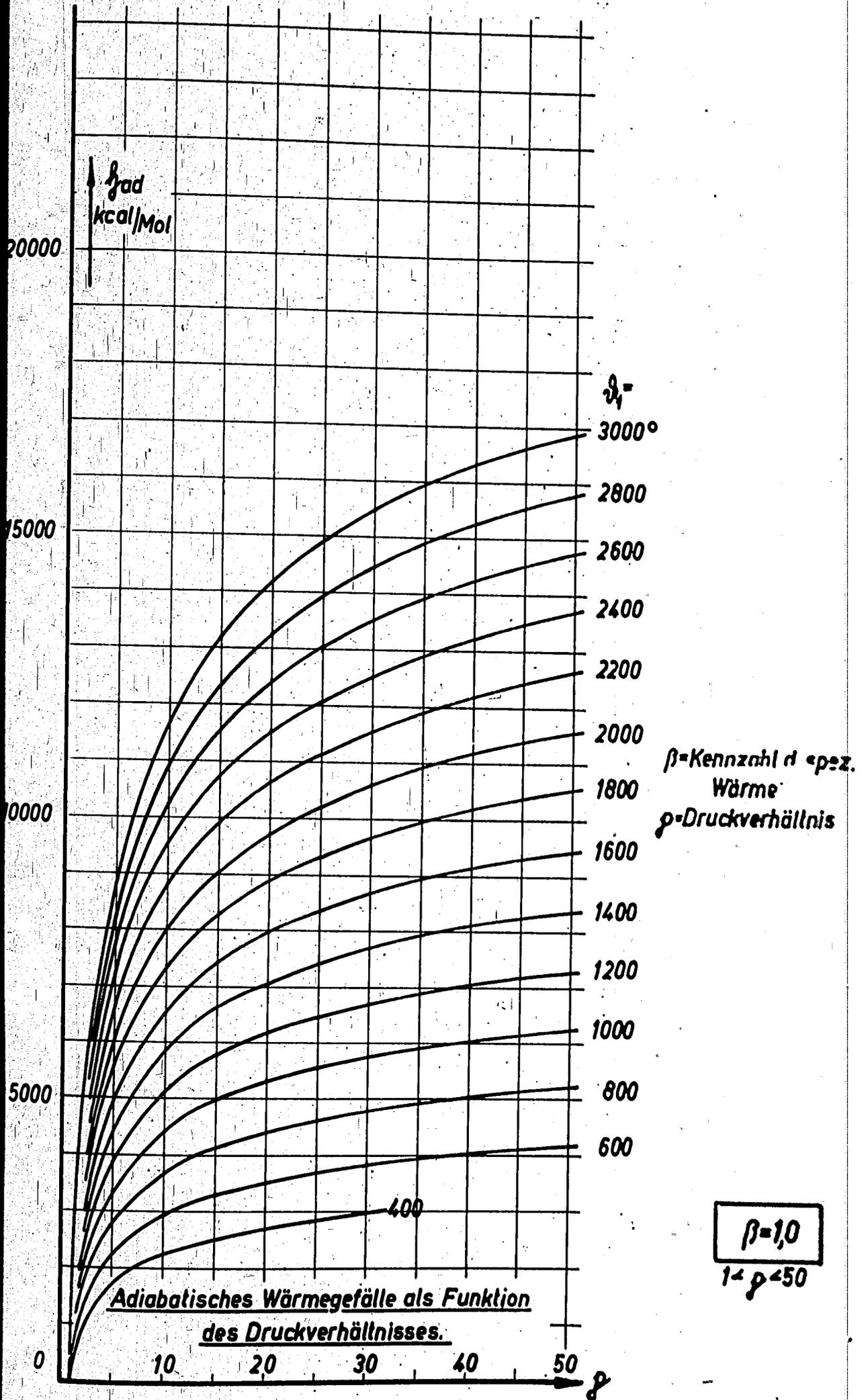
Thermodynamische Hilfstafeln



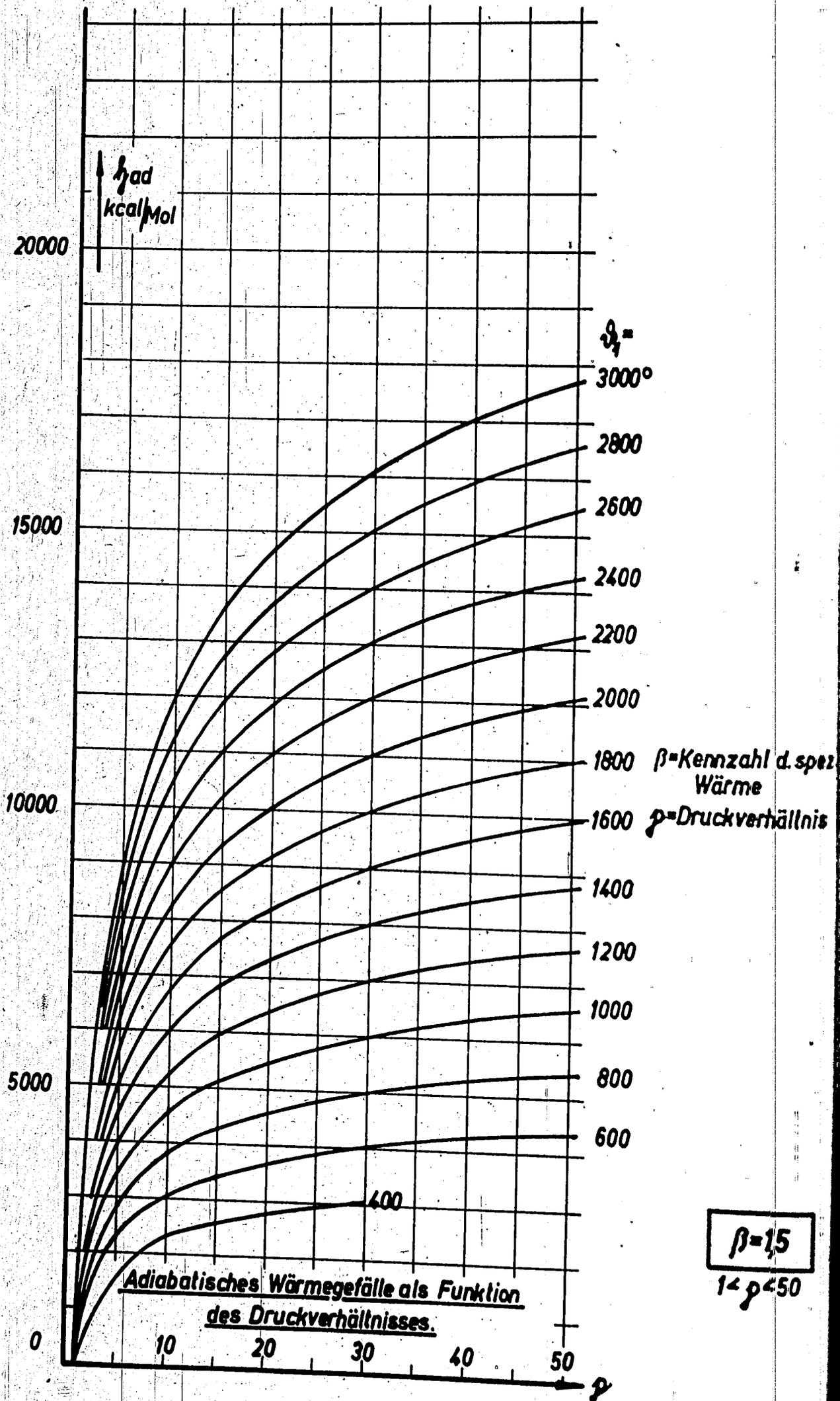
$p=350$

Adiabatische Endtemperatur als
Funktion von β .

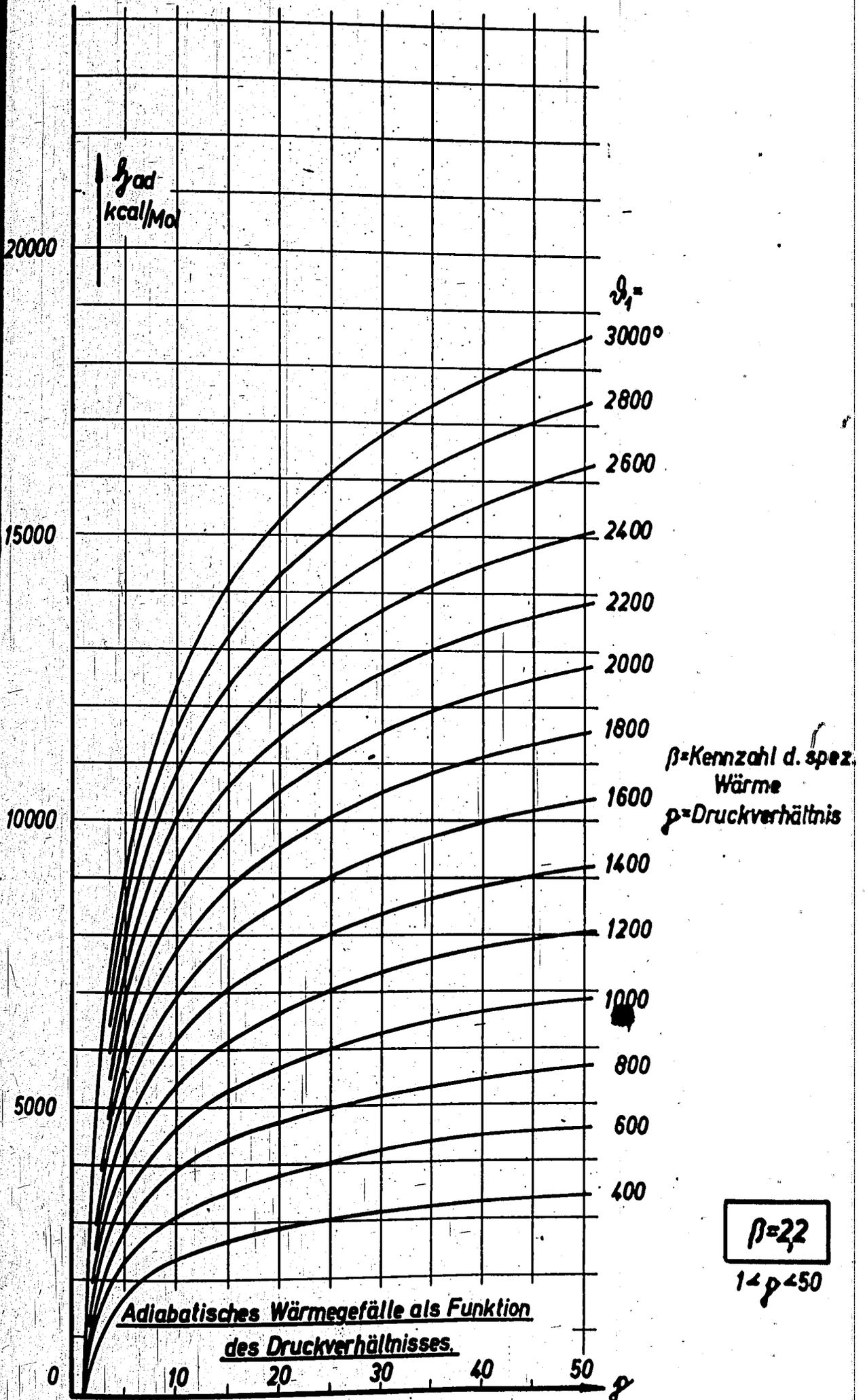
Thermodynamische Hilfstafeln



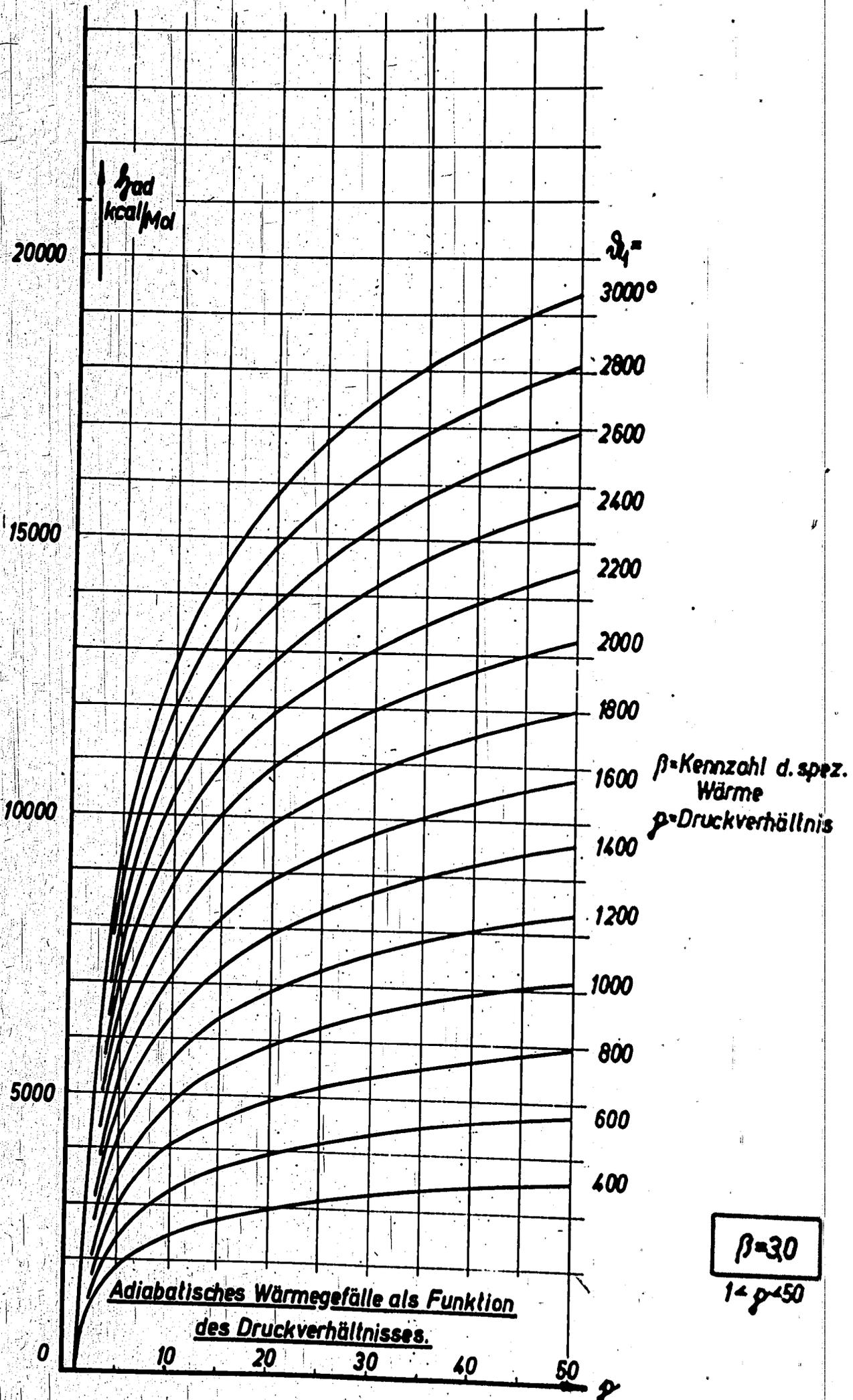
Thermodynamische Hilfstafeln



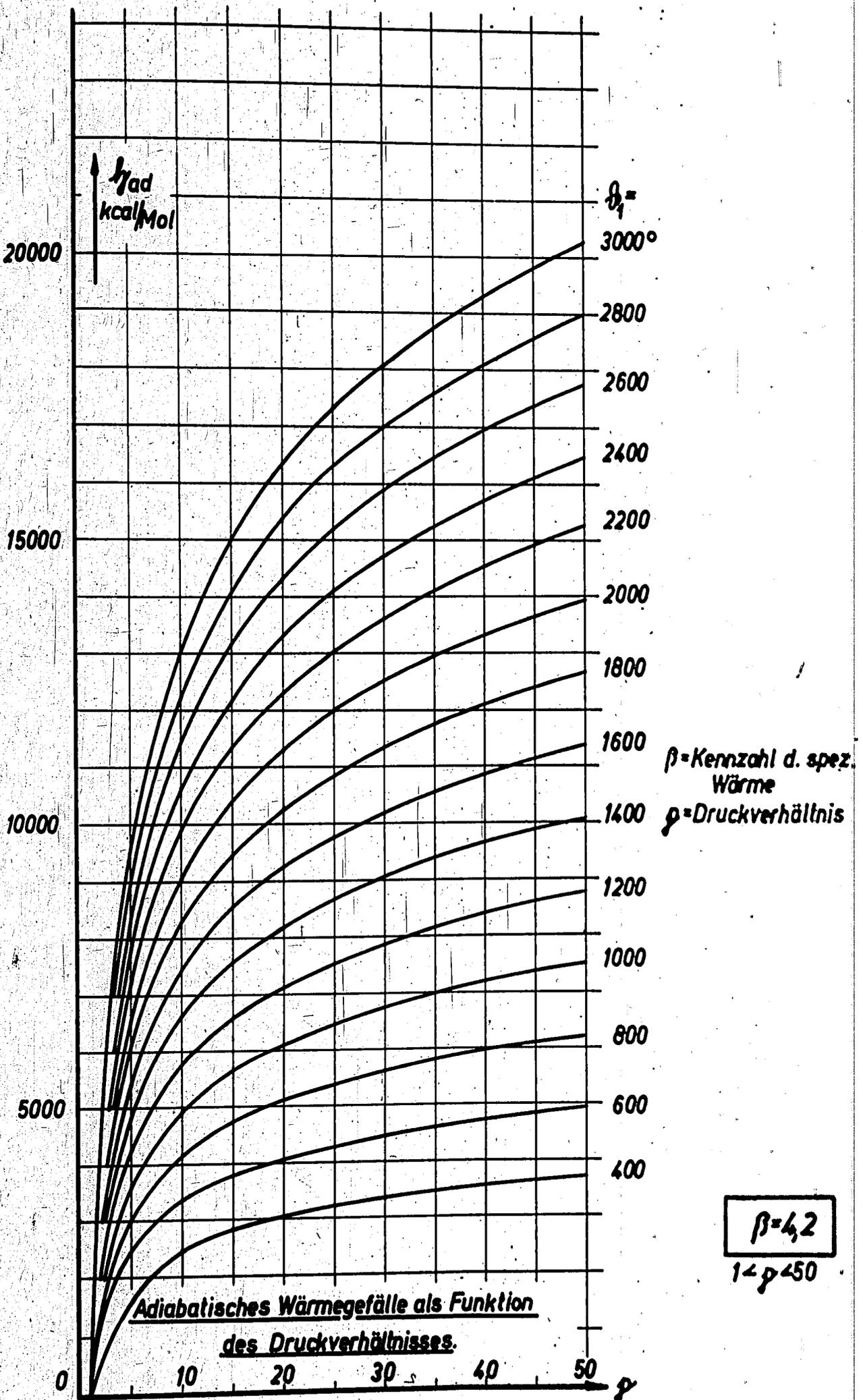
Thermodynamische Hilfstafeln



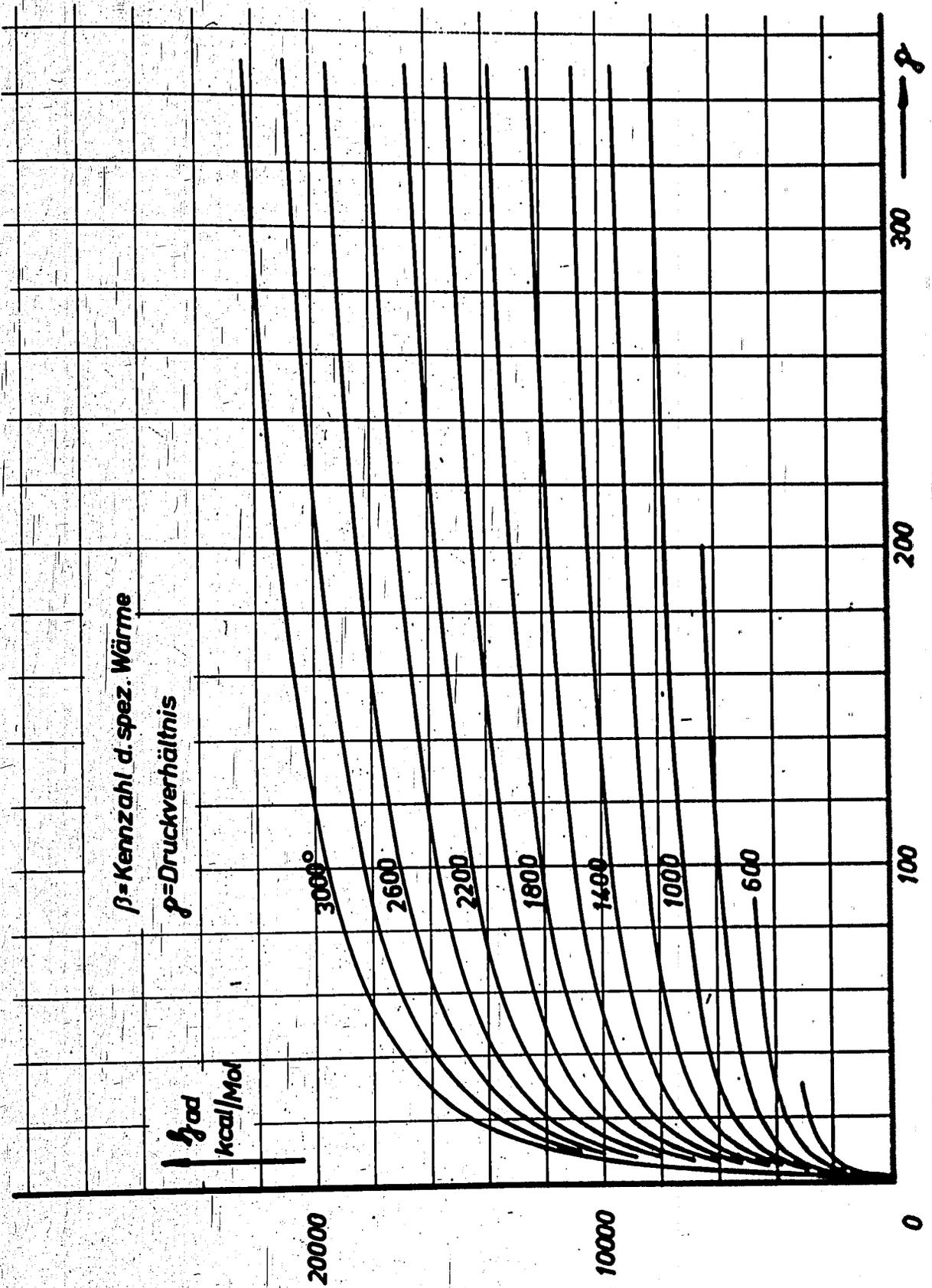
Thermodynamische Hilfstafeln



Thermodynamische Hilfstafeln



Thermodynamische Hilfstafeln

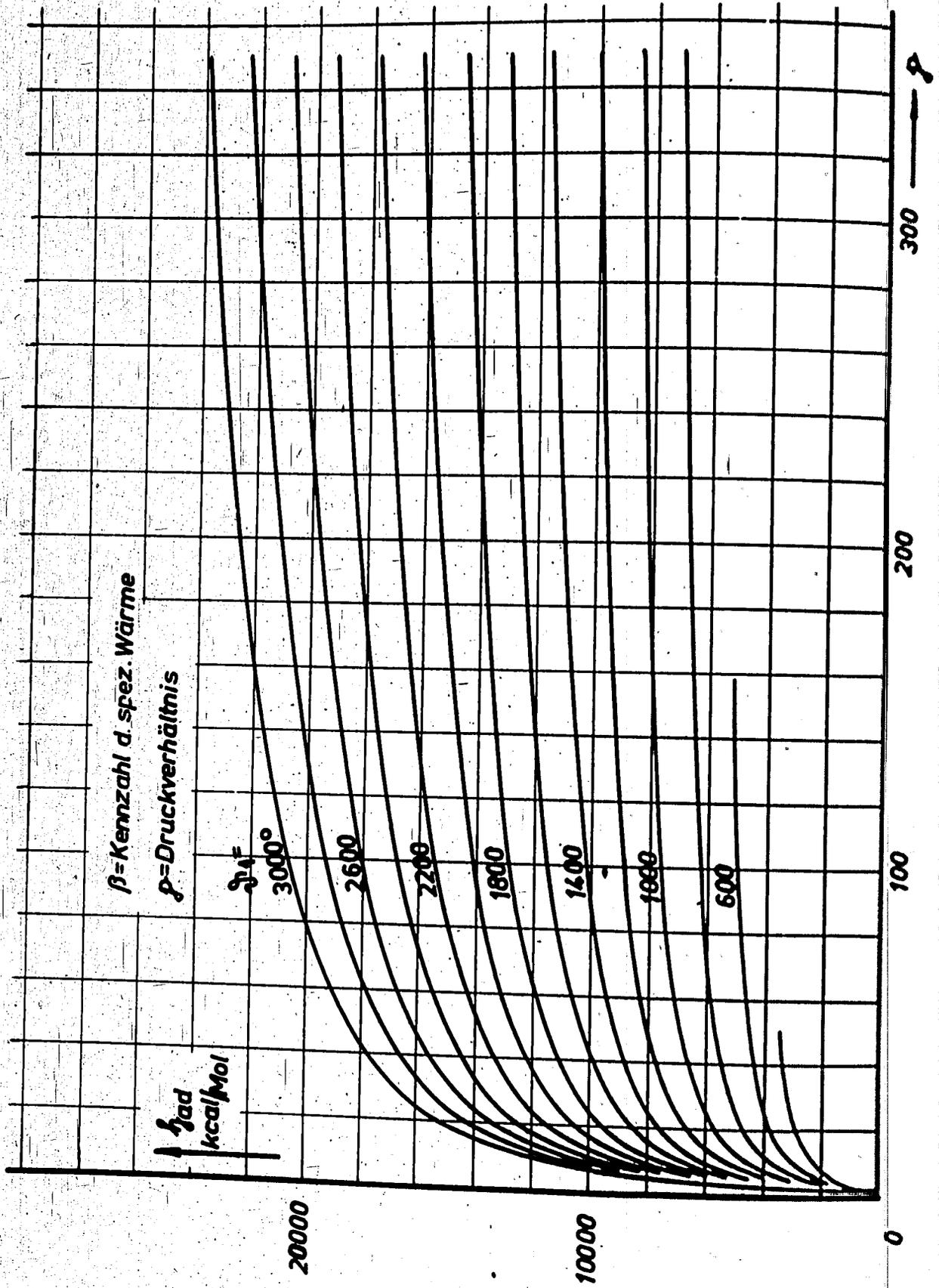


Adiabatisches Wärmegefälle als Funktion

des Druckverhältnisses.

$\beta = 1,5$
 $1 < \rho < 350$

Thermodynamische Hilfstafeln

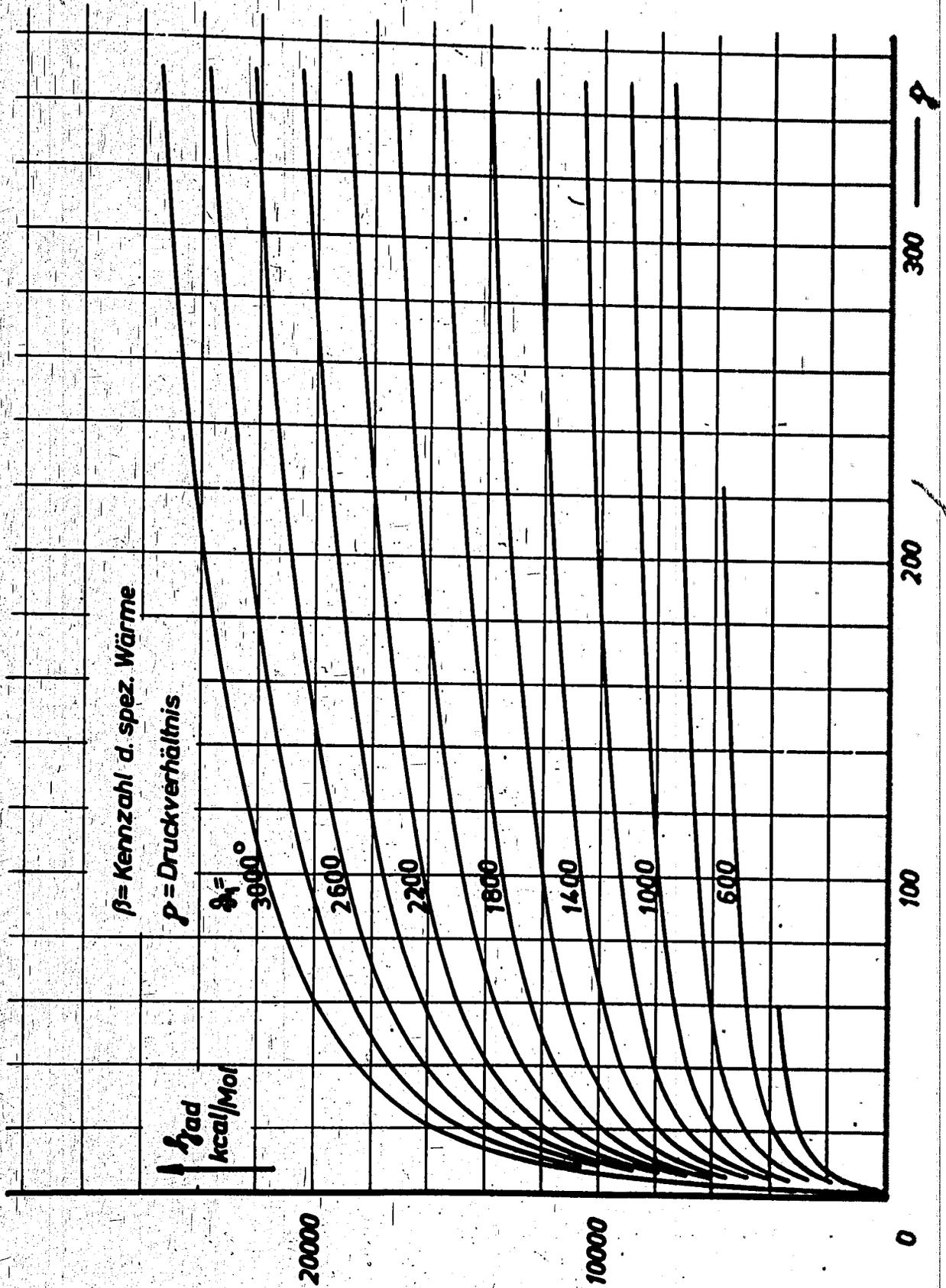


Adiabatisches Wärmegefalle als Funktion

des Druckverhältnisses.

$\beta = 22$
 $1 < p < 350$

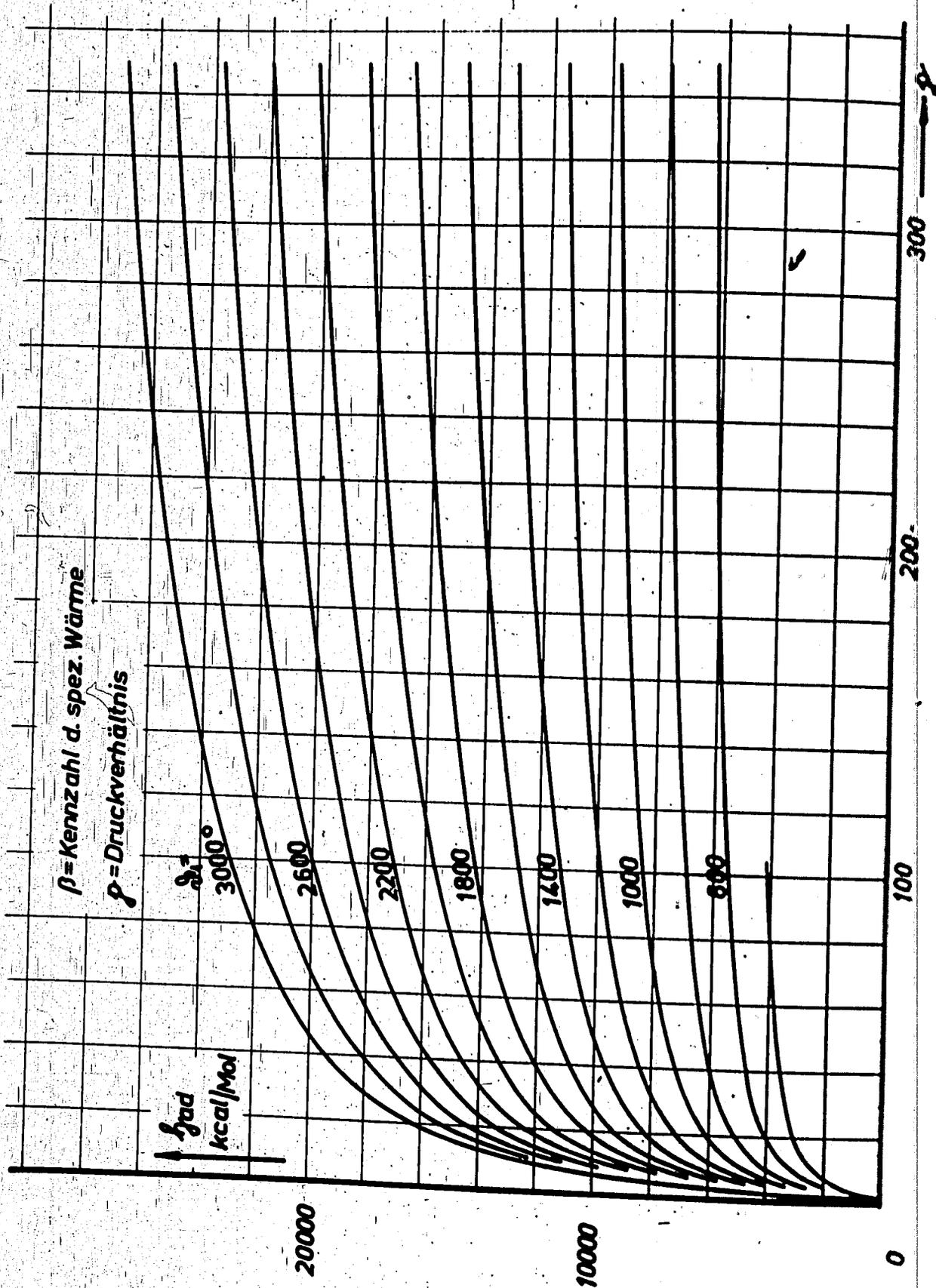
Thermodynamische Hilfstafeln



Adiabatisches Wärmegefälle als Funktion
des Druckverhältnisses.

$\beta=30$
 $1 < p < 350$

Thermodynamische Hilfstafeln

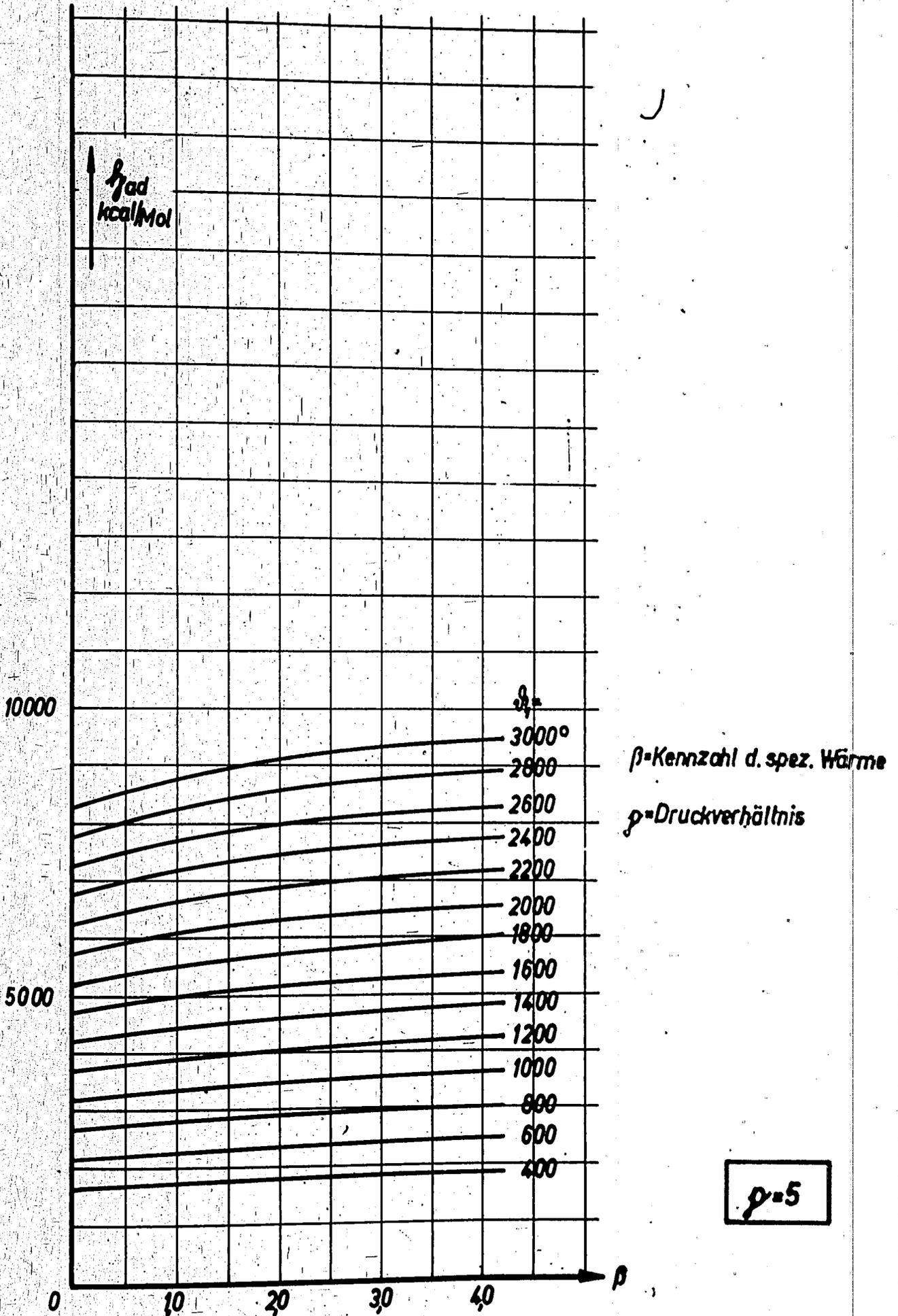


Adiabatisches Wärmegefälle als Funktion

des Druckverhältnisses.

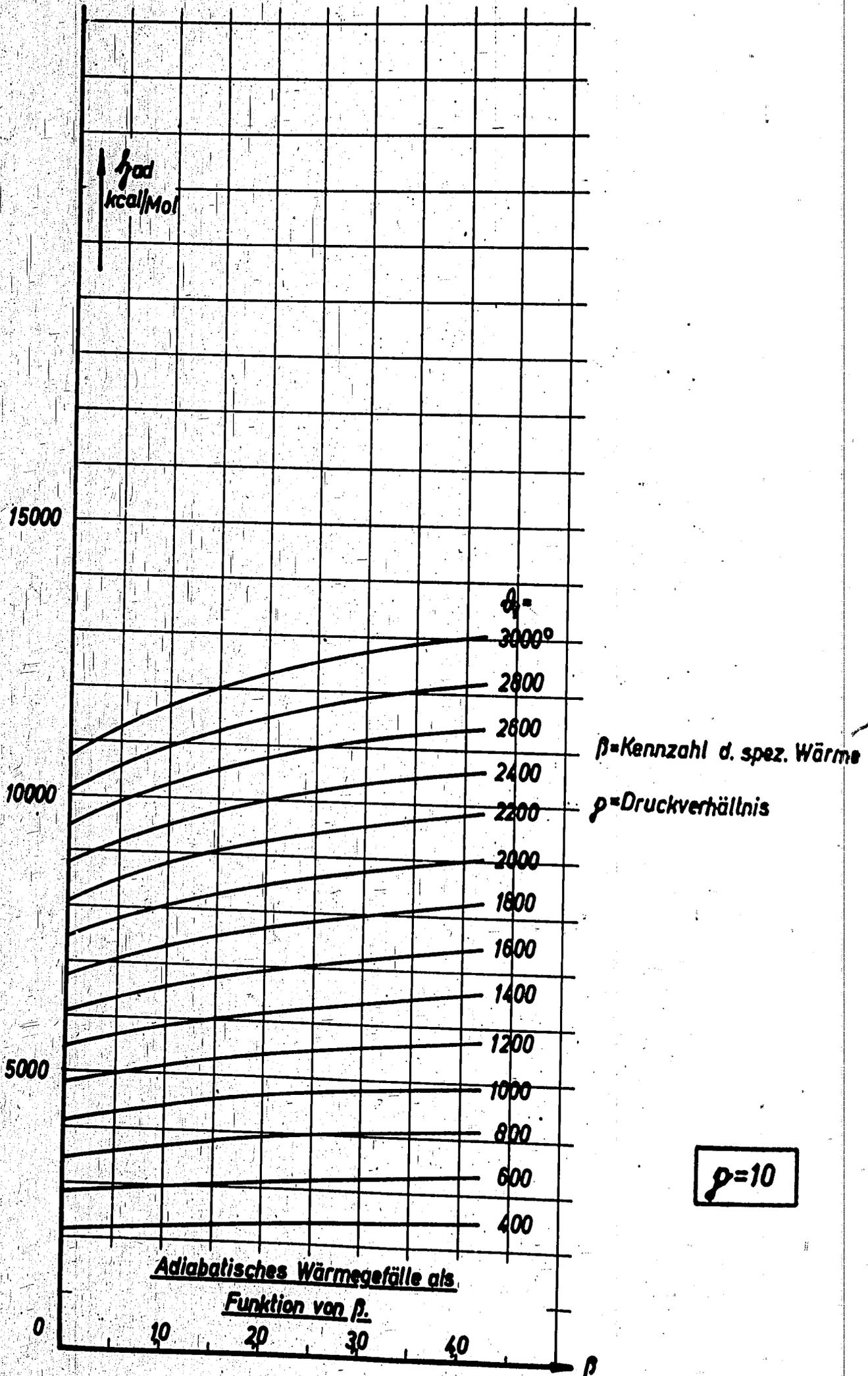
$\beta = 4,2$
 $1 < p < 350$

Thermodynamische Hilfstafeln

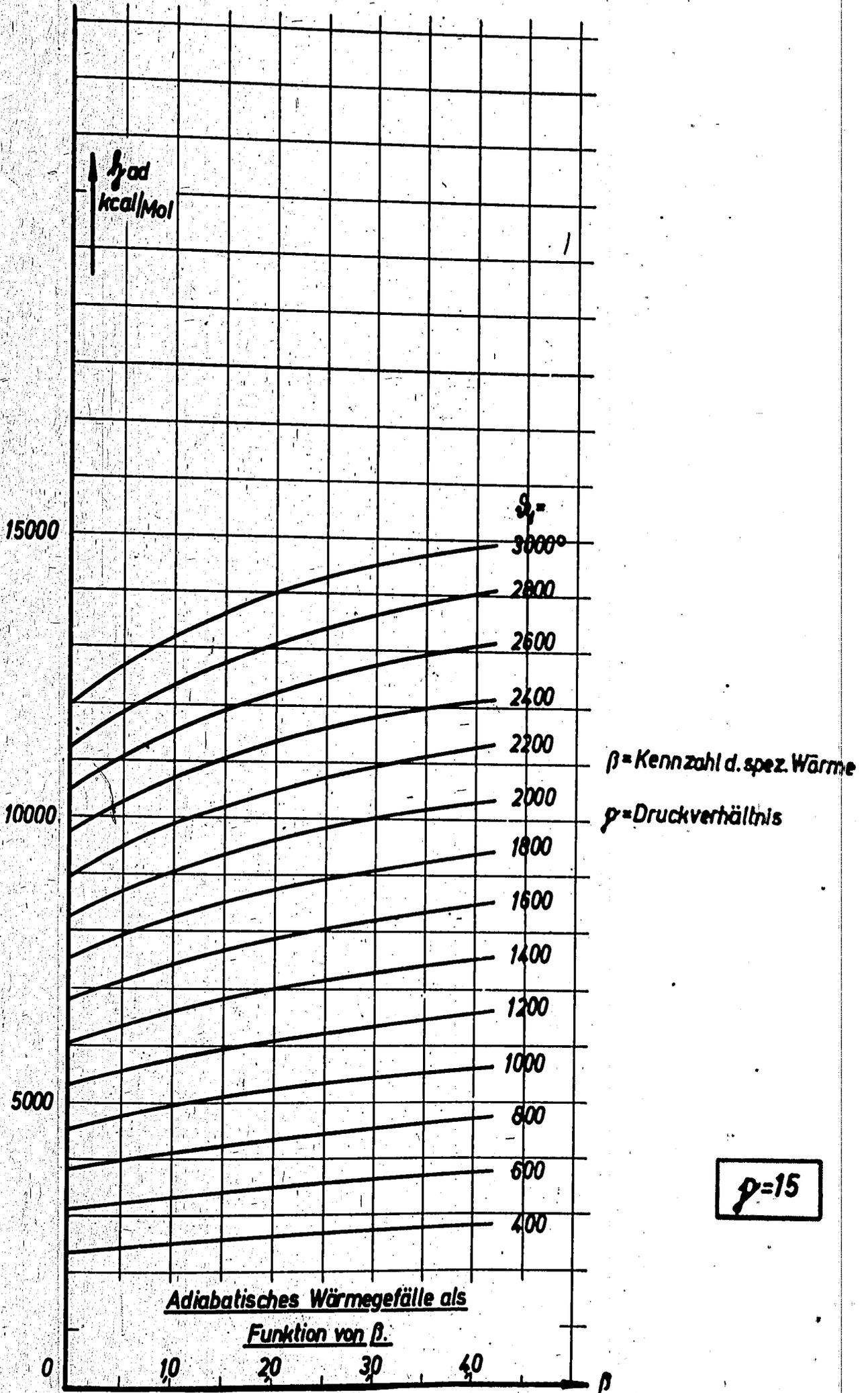


Adiabatisches Wärmegefälle als
Funktion von β .

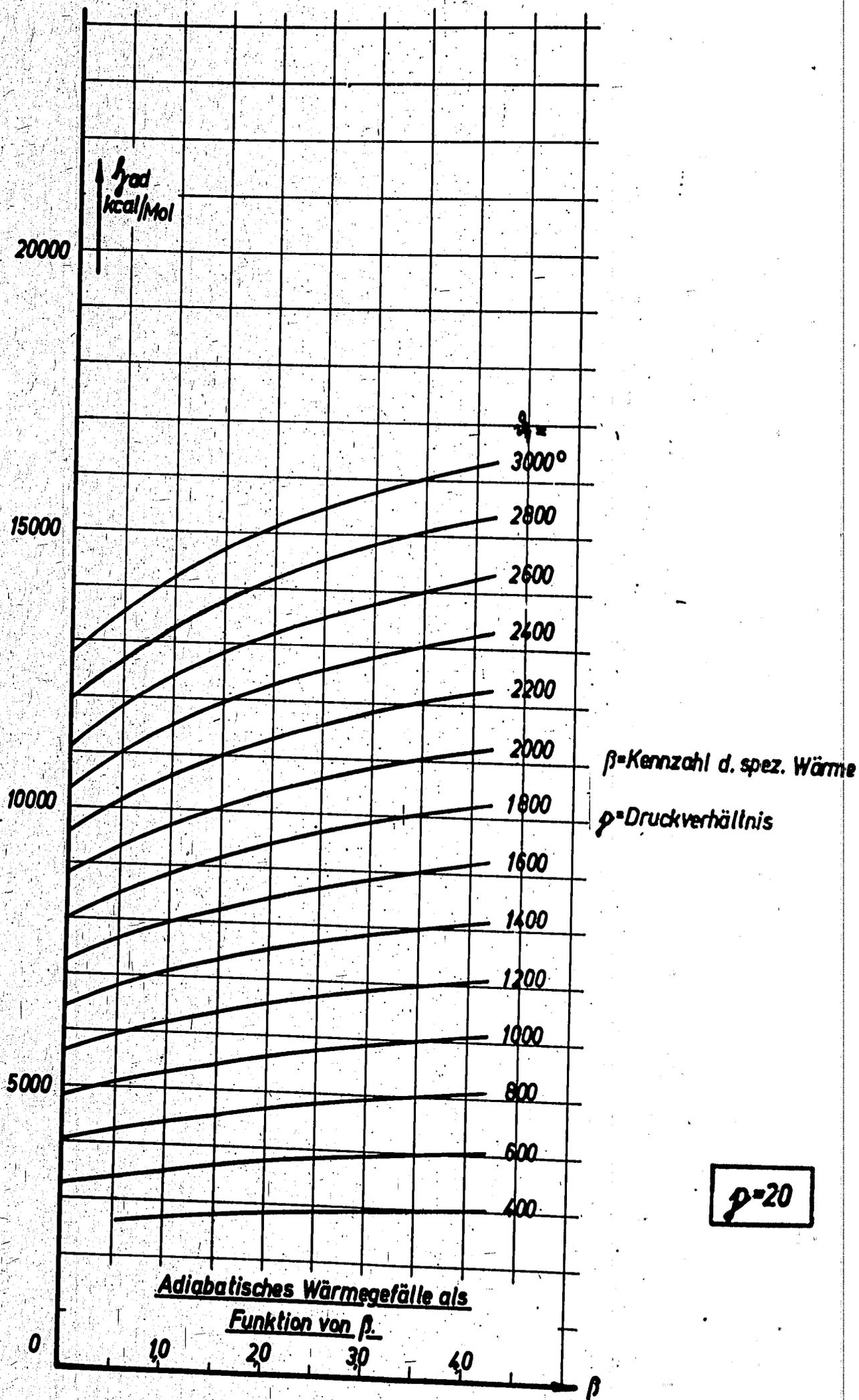
Thermodynamische Hilfstafeln



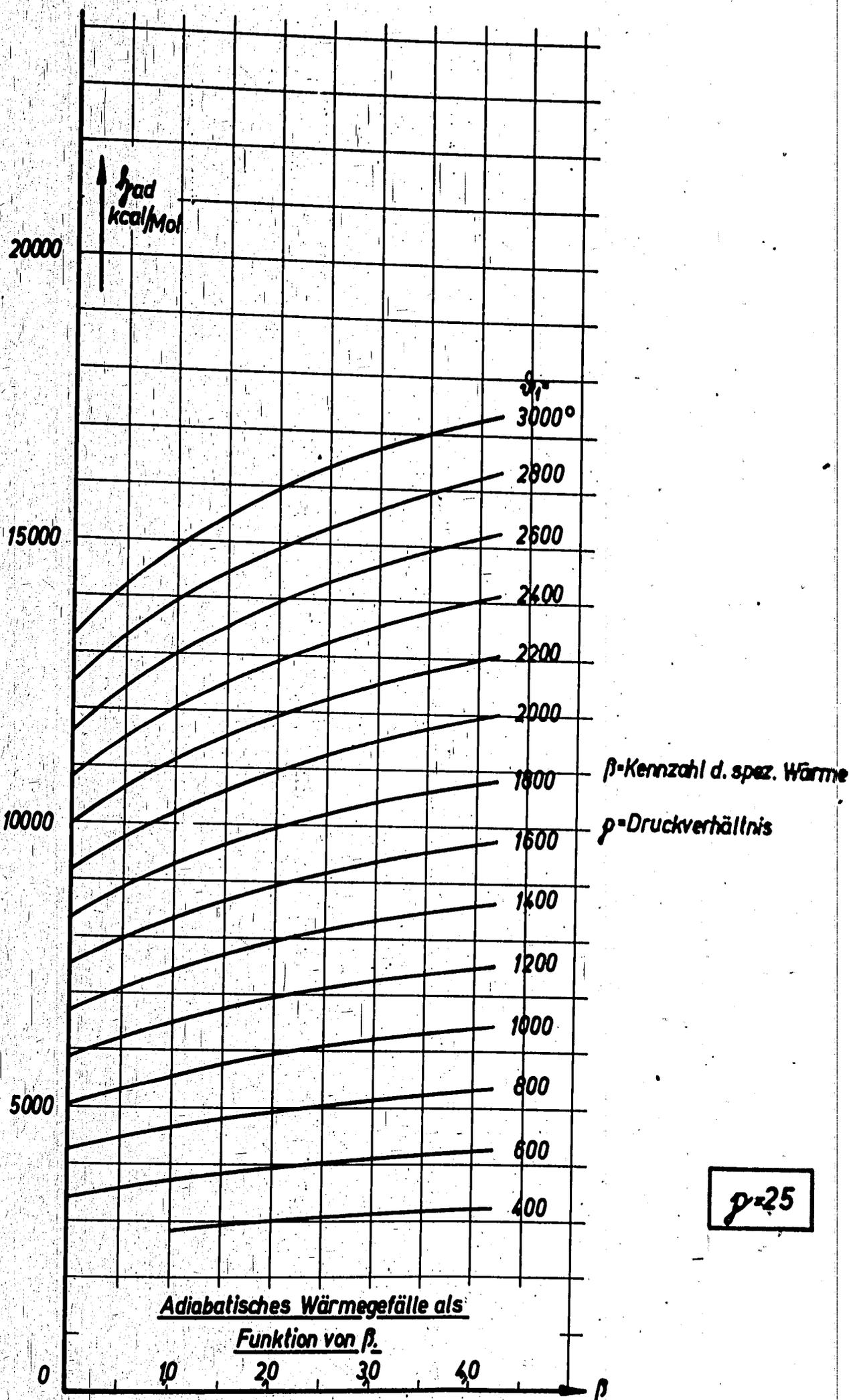
Thermodynamische Hilfstafeln



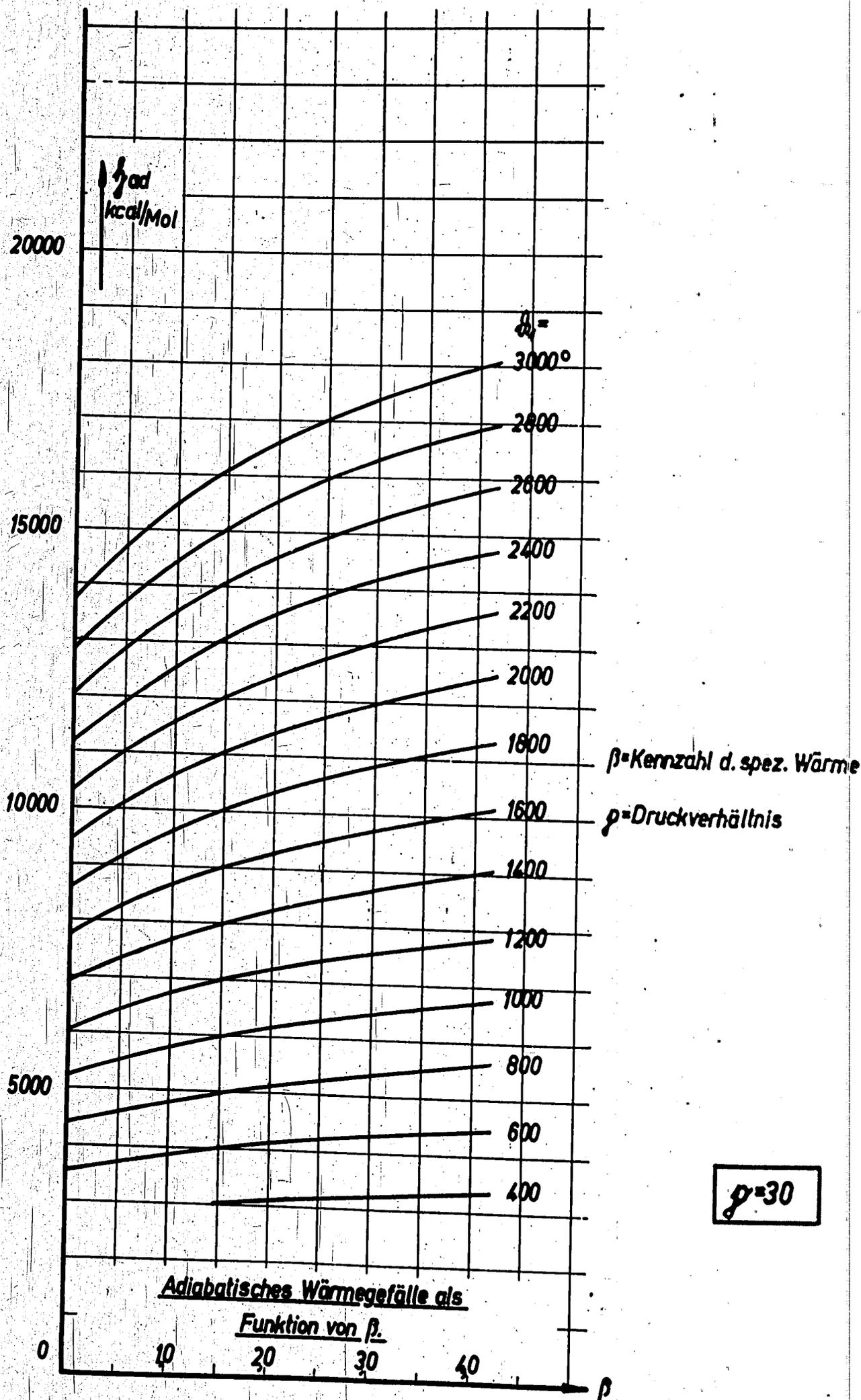
Thermodynamische Hilfstafeln



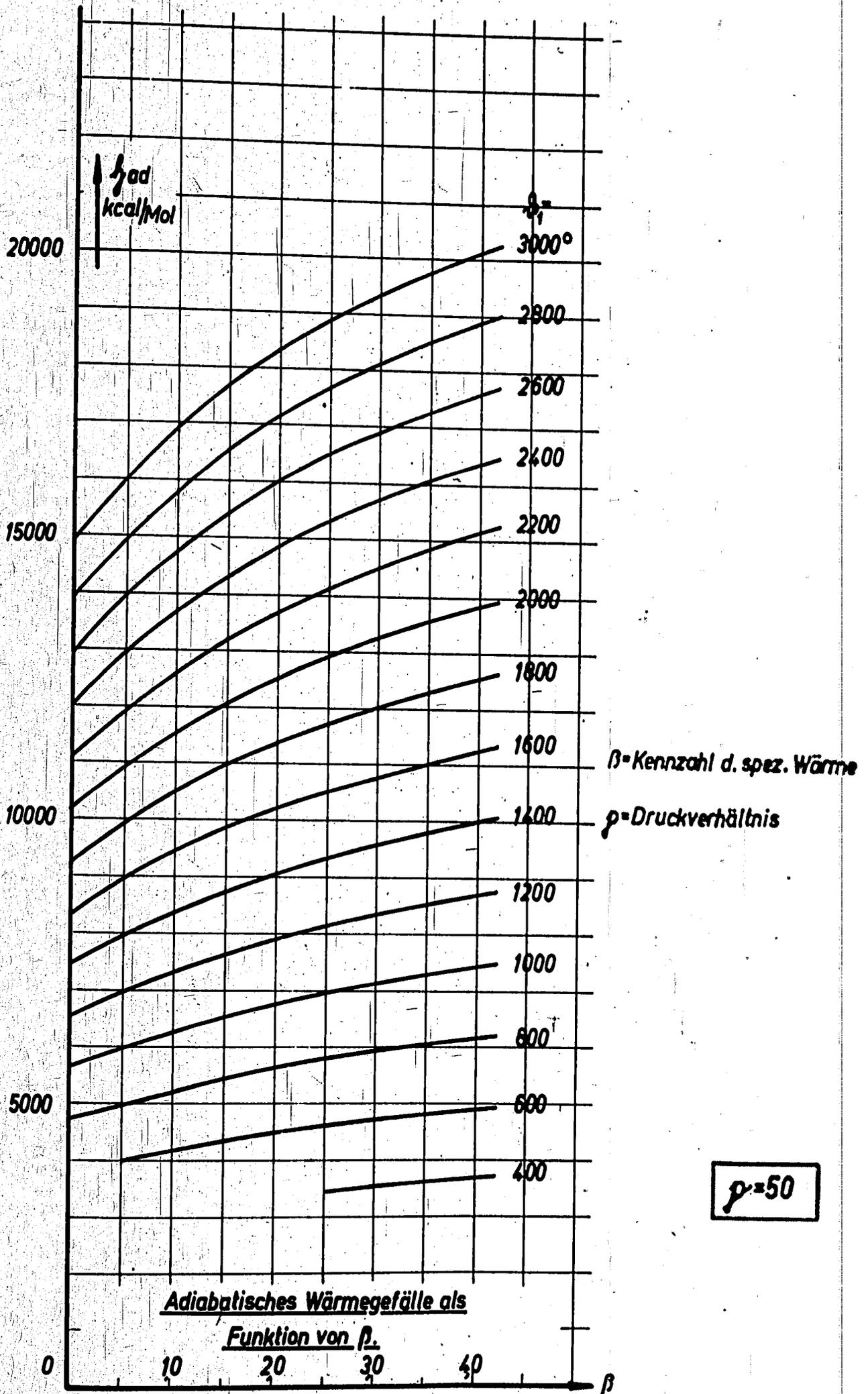
Thermodynamische Hilfstafeln



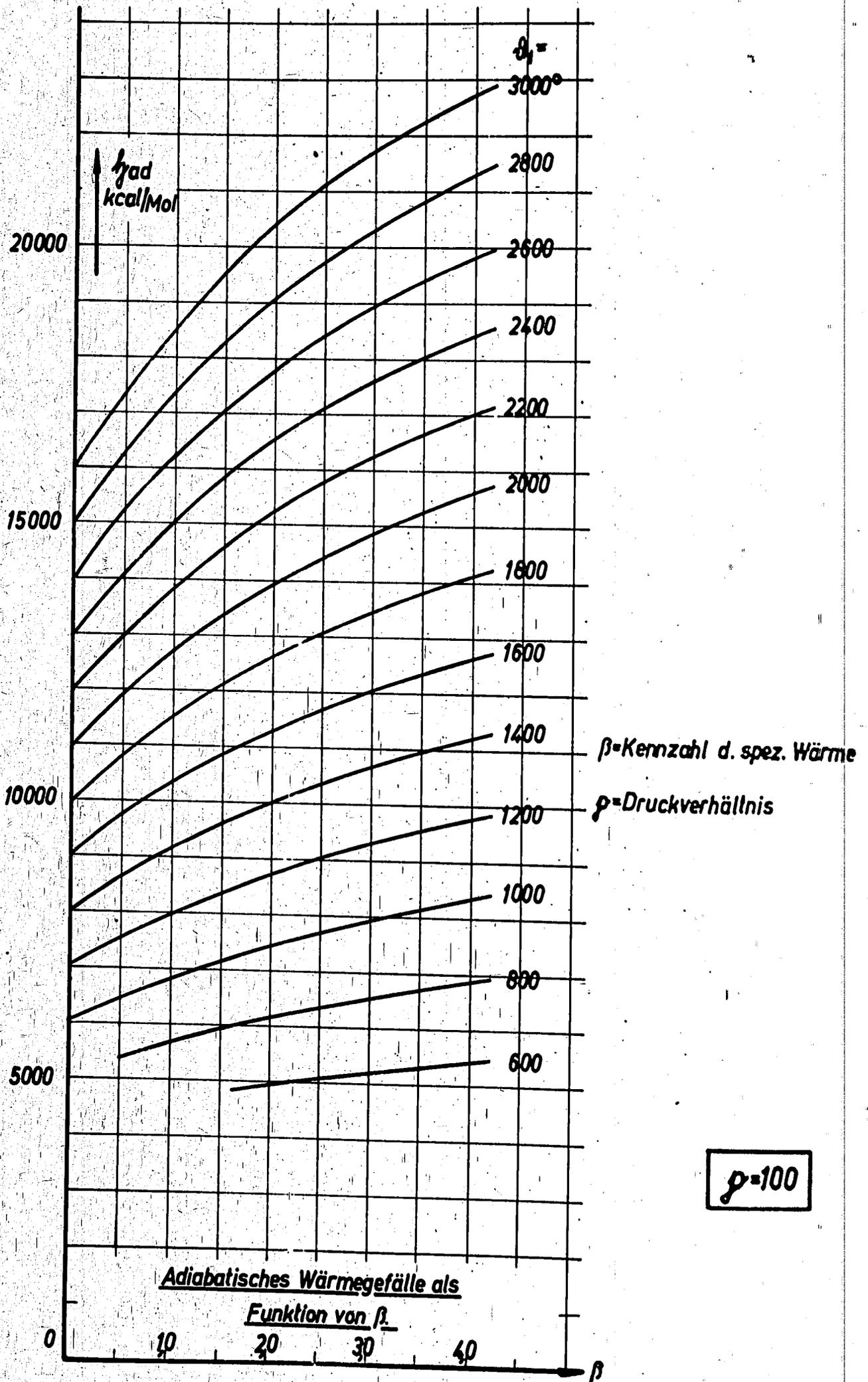
Thermodynamische Hilfstafeln



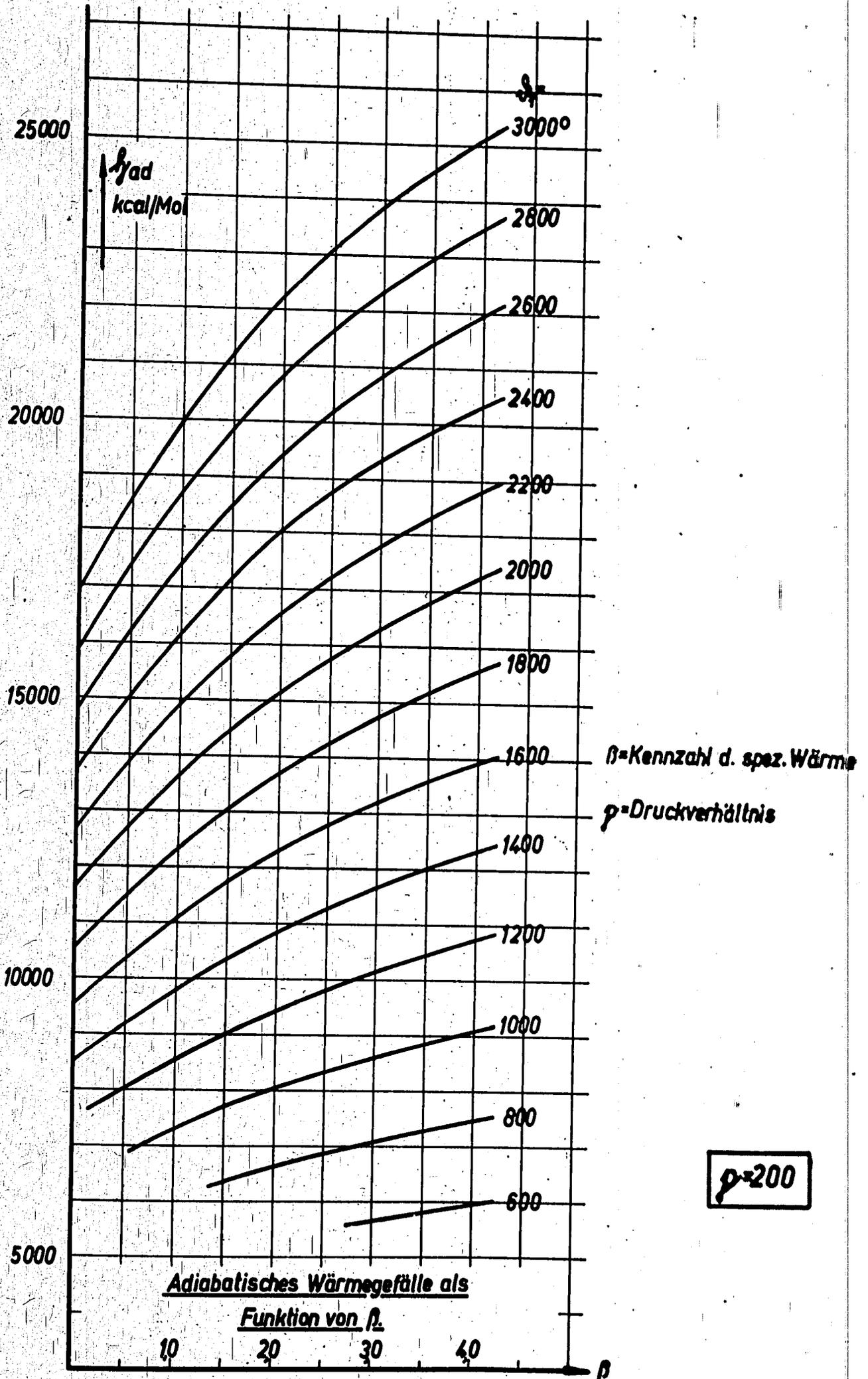
Thermodynamische Hilfstafeln



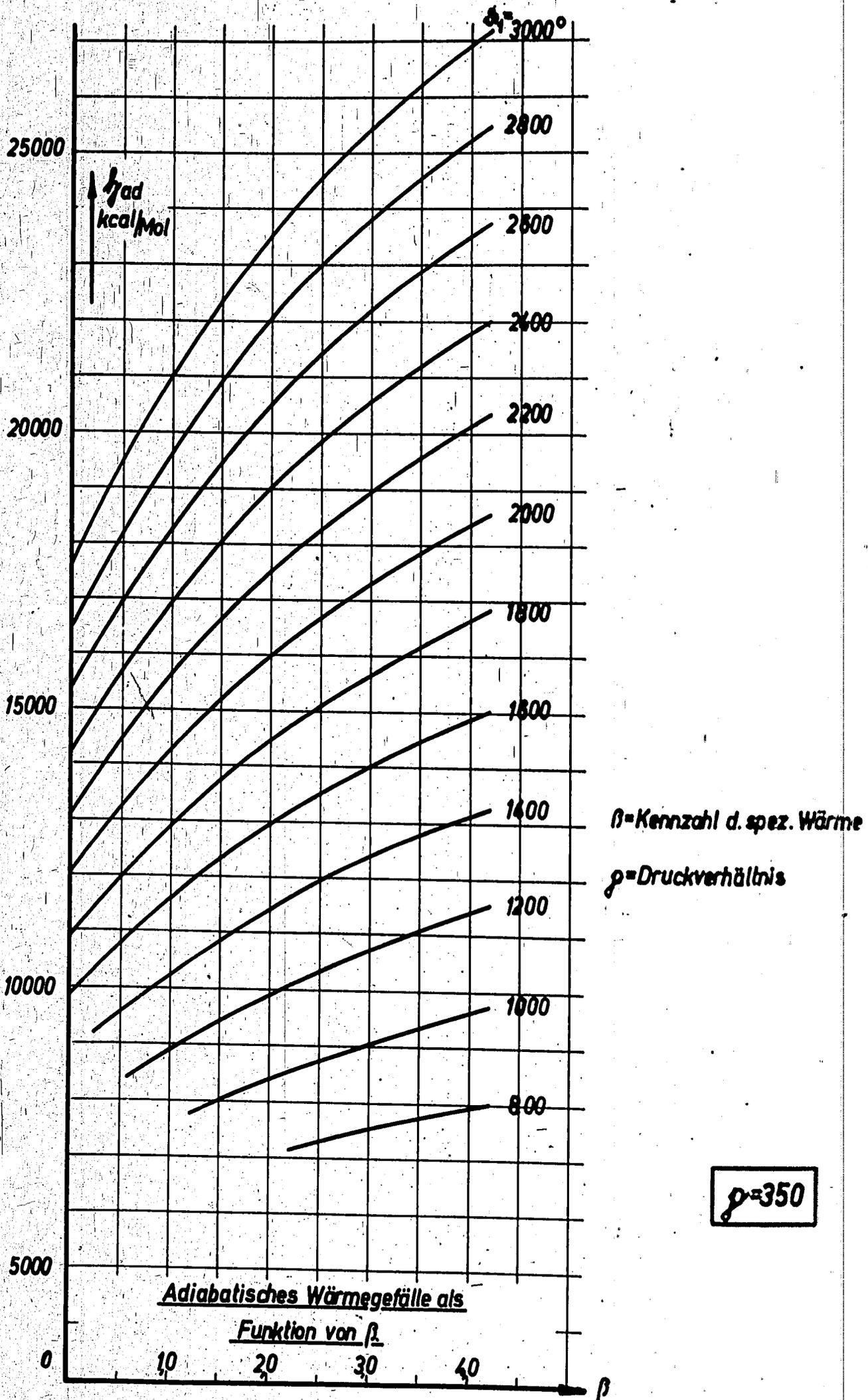
Thermodynamische Hilfstafeln

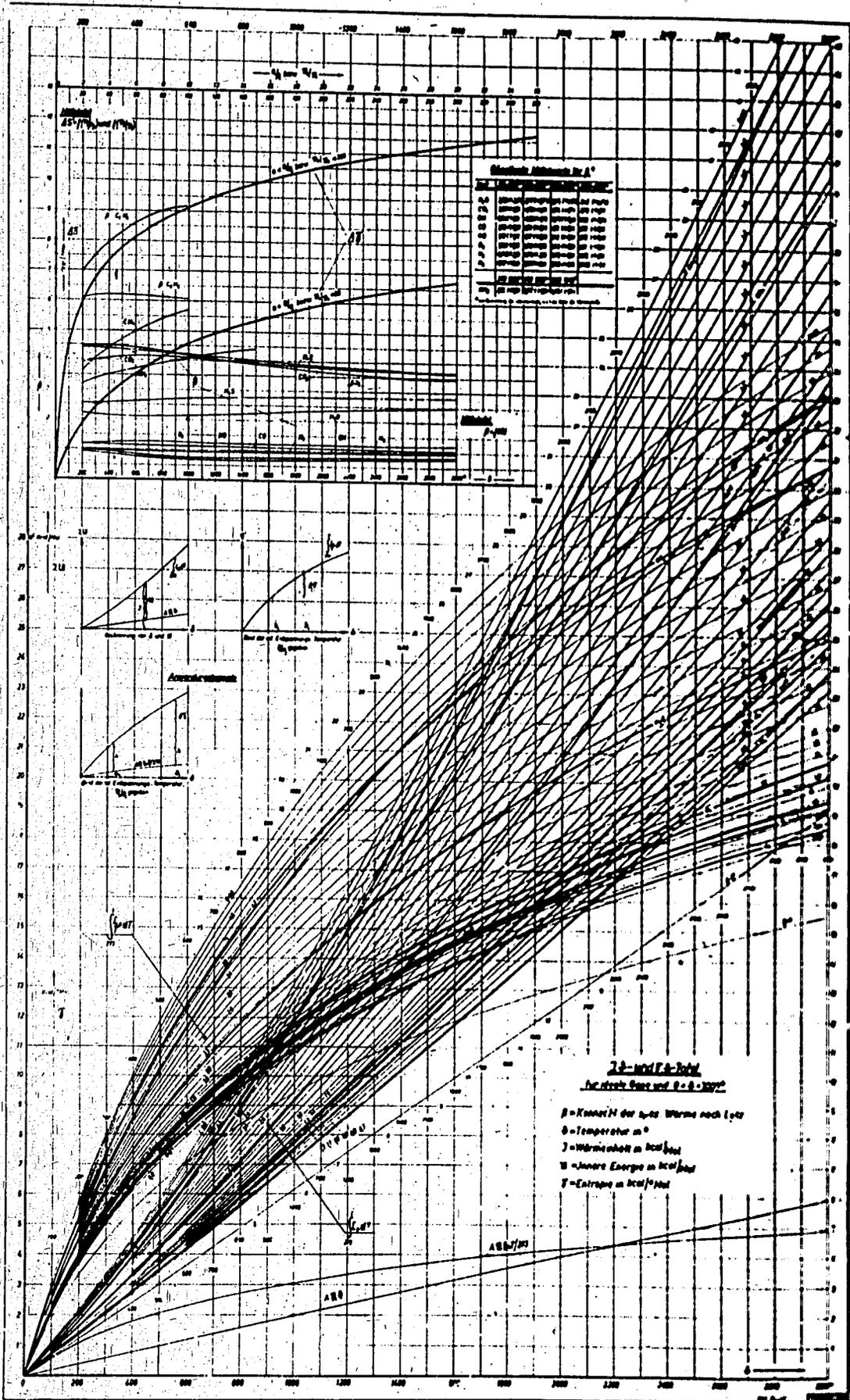


Thermodynamische Hilfstafeln



Thermodynamische Hilfstafeln





Diese Tafel kann auch im Format A 0 gegen Erstattung der Unkosten bezogen werden.