

KFK-274

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

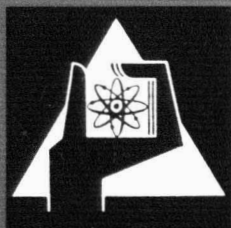
Februar 1965

KFK 274

Institut für Reaktorentwicklung

Thermoschockspannungen in einer ebenen Wand

W. Lang



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Februar 1965

KFK 274

Institut für Reaktorentwicklung

Thermoschockspannungen in einer ebenen Wand

von

W.Lang

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite:</u>
1. Allgemeines über Thermoschock und Thermoschockspannungen.	1
2. Randbedingungen der vorliegenden Thermoschockberechnung.	2
3. Die Temperaturverteilung in der Wand.	4
4. Bestimmung der Thermoschockspannungen.	
5. Temperaturänderungsgeschwindigkeit.	9
6. Thermoschockspannungen an der isolierten Wandseite.	10
7. Aufbau und Anwendung der Thermoschock-Nomogramme.	11
8. Praktisches Rechenbeispiel.	12

Abbildungen

- Abb.1 Übergang zu dimensionslosen Koordinaten.
- Abb.2 Zug- und Druckspannungen über den Querschnitt der Wand.
- Abb.3 Spannungsfaktoren.
- Abb.4 Temperaturlausgleich über Wandstärke für verschiedene ζ_0 .
- Abb.5 Temperaturverlauf zur Zeit ζ_0 für verschieden starke Schocks.
- Abb.6 Spannungsfaktoren f_0 und f_0^* als Funktion von ζ_0 .
- Abb.7 Thermoschocknomogramm.
- Abb.8 Thermoschocknomogramm.

1. Allgemeines über Thermoschock und Thermoschockspannungen.

Wir sprechen von einem Thermoschock, wenn die Temperaturen an der Oberfläche eines Bauteiles "schockartig" geändert werden. Wegen der endlichen Temperaturleitzahl des Werkstoffes vergeht dabei eine gewisse Zeit bis sich die aufgebrachte Temperaturänderung über den Wandquerschnitt des Bauteiles ausgeglichen hat. Die ungleichmässige Temperaturverteilung im Bauteil während des instationär ablaufenden Thermoschocks ist nun Ursache für die Thermoschockspannungen.

Im Falle der Flüssigmetallkühlung ist den Thermoschockspannungen besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden. Die Wärmeübergangszahl zwischen dem Flüssigmetall (Natrium) und der Oberfläche des Bauteiles an der dieses Kühlmittel vorbeiströmt, ist hier sehr hoch. Bei einer schnellen Änderung der Kühlmitteltemperatur nimmt deshalb die angeströmte Seite der Wand fast augenblicklich die Temperatur des heissen (kalten) Natriums an. Als Folge kann sich ein besonders grosser Temperaturgradient in der Wand ausbilden, der seinerseits entsprechend grosse Thermoschockspannungen zur Folge hat.

Grundsätzlich treten Thermoschockspannungen auch bei den normalen Betriebszustandsänderungen des Reaktors auf (z.B. Ein- und Abschalten des Reaktors); besonders gefährlich und für die Auslegung der Reaktor-Komponenten maßgebend sind hingegen die Thermoschockspannungen, die bei den Störfällen des Reaktors (z.B. Scram) entstehen, da hier die Temperaturänderungsgeschwindigkeit des Kühlmittels sehr hohe Werte erreicht.

Wird bei einem Thermoschock nach einer gewissen Zeit die Temperaturänderungsgeschwindigkeit des Kühlmittels wieder zu Null, so stellt sich nach einer für den Ausgleich erforderlichen Übergangszeit ein stationärer Temperaturverteilungszustand in der Wand ein. In der nachstehend beschriebenen Berechnung, in der eine Wandseite als isoliert angenommen wird, ist die Temperatur

über den Wandquerschnitt für diesen stationären Zustand konstant u. die Wand ist demzufolge frei von Wärmespannungen.

2. Randbedingungen der vorliegenden Thermoschockberechnung.

Um die Thermoschockspannungen rechnerisch erfassen zu können, muss man die zeitlich veränderliche Temperaturverteilung über den Querschnitt der Wand kennen. Wie sich nun der Temperaturentwurf und -ausgleich in der Wand vollzieht und wie groß die sich hierbei ergebenden Thermoschockspannungen werden, hängt von einer Reihe von Randbedingungen ab. Der Thermoschockberechnung dieser Arbeit wurden die folgenden Annahmen zugrunde gelegt:

- a) Eindimensionaler Wärmestrom senkrecht zur Wand.
- b) Ein unendlich guter Wärmeübergang vom Kühlmittel (Natrium) auf die Wand: $\alpha_{\text{ü}} = \infty$. Das bedeutet, dass die Kühlmitteltemperatur und die Wandoberflächentemperatur immer gleich gross sind. Diese Annahme wirkt gegenüber endlichen Wärmeübergangszahlen verschärfend.
- c) Eine Wandseite ist vollkommen isoliert.
- d) Bei Beginn des Thermoschocks haben das Kühlmittel und die Wand über ihre ganze Dicke die gleich grosse Ausgangstemperatur.
- e) Der Temperaturanstieg(-abfall) des Kühlmittels erfolgt linear um einen Betrag ΔT_0 ; daran anschliessend bleibt die Kühlmitteltemperatur konstant.
- f) Der Thermoschock wird für den Fall der ebenen Wand berechnet. Für die Rohr- und

Behälterwände des Natriumsystems (Niederdruck) gilt mit guter Näherung gleichfalls die für die ebene Wand erhaltene Lösung, da diese Körper ein Verhältnis Wandstärke zu Durchmesser $< 0,1$ aufweisen und damit als dünnwandig anzusprechen sind.

Für die Spannungsermittlung sind noch zwei weitere Annahmen getroffen:

- g) Durch den Thermoschock soll die Gesamtspannung für keine Stelle über die Elastizitätsgrenze hinaus ansteigen; evtl. bereits vorhandene Spannungen - z.B. durch einen Innendruck verursacht - sind als Teil dieser Gesamtspannung mitzuberücksichtigen. Mit dieser Bedingung lässt sich die auftretende Beanspruchung noch mit der Elastizitätstheorie bestimmen. Statt der Elastizitätsgrenze wird man im praktischen Fall die Streckgrenze einsetzen.
- h) Ein Verbiegen der Platte als Folge der ungleichmässigen Temperaturverteilung wird nicht zugelassen. Bei einem Bauteil mit Zylindergeometrie ist diese Bedingung bereits durch die Gestalt erfüllt, sodaß ein zusätzlicher äusserer Zwang nicht erforderlich ist. Wo ein Verbiegen zugelassen wird, verringern sich die thermischen Spannungen entsprechend.

3. Die Temperaturverteilung in der Wand.

Für die oben genannten Randbedingungen wird die räumlich-zeitliche Temperaturverteilung durch folgende Beziehung beschrieben [1] :

$$(1) \vartheta(\zeta, \zeta) = \frac{1}{\zeta_0} \left[\zeta - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16}{\pi^3 (2n-1)^3} \left(1 - e^{-\frac{\pi^2 (2n-1)^2 \zeta}{4}} \right) \sin \frac{\pi}{2} (2n-1) \zeta \right]$$

Gültig für den Bereich:

$$0 \leq \zeta \leq \zeta_0$$

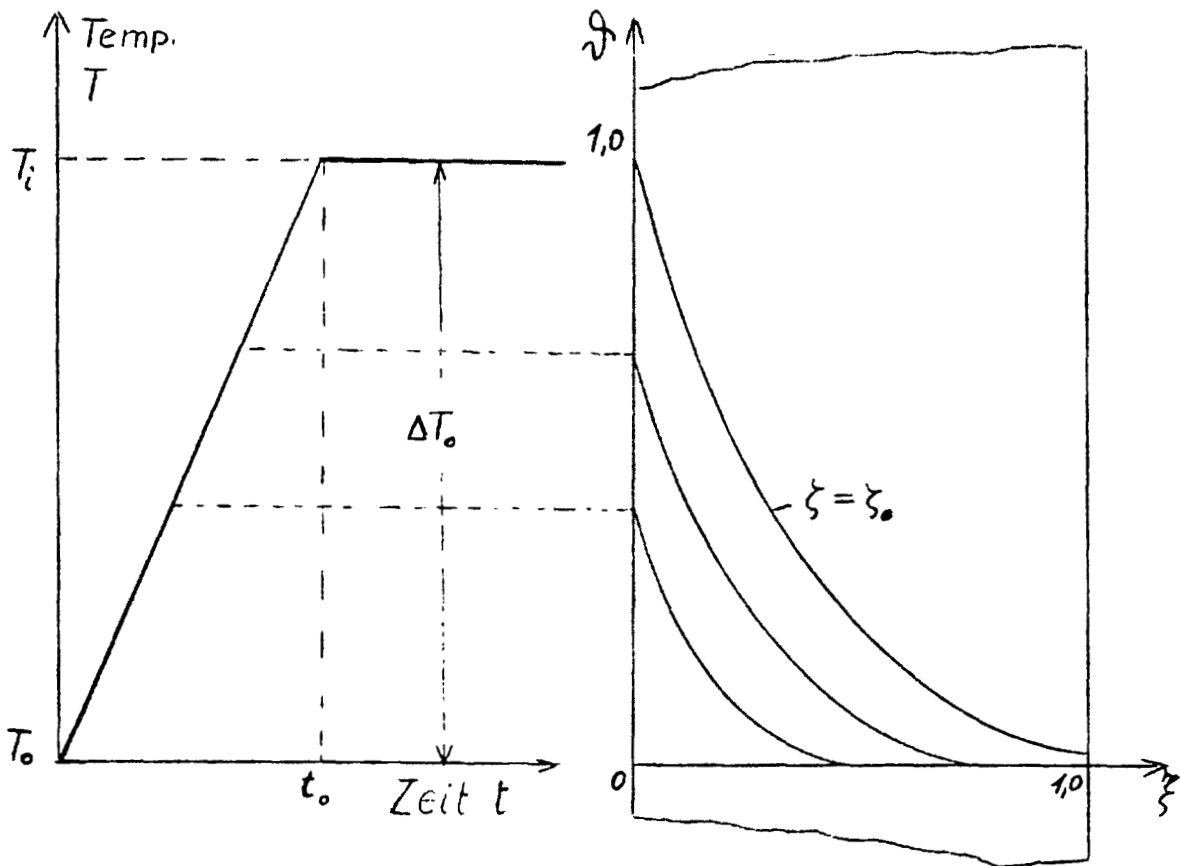


Abb.:1

Die Orts- und Zeitkoordinate sowie die Temperatur sind als dimensionslose Grössen eingeführt:

$$\xi = \frac{\lambda}{s}$$

$$(2) \zeta = \frac{a \cdot t}{s^2}$$

$$q_{(x,t)} = \frac{\bar{T}_{(x,t)} - \bar{T}_0}{\Delta T_0}$$

- s Wandstärke [cm]
- a Temperaturleitzahl $\left[\frac{\text{cm}^2}{\text{sec}} \right]$
- t Zeit [sec]
- T_0 Ausgangstemperatur d.Kühlmittels bzw. d.Wand [°C]
- ΔT_0 Temperaturspanne des Thermoschocks [°C]
- $T_{(x,t)}$ Temperatur, die zwischen T_0 und T_i liegt [°C]

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

- λ Wärmeleitzahl des Wandmaterials $\left[\frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ \text{C}} \right]$
- ρ Dichte $\left| \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right|$
- c Spez. Wärme $\left[\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ \text{C}} \right]$

Die angegebene Gleichung gilt nur für den Bereich des linearen Temperaturanstieges, d.h. bis zur Zeit t_0 . Die dimensionslose Zeit wird hierfür:

$$(3) \quad \zeta_0 = \frac{a \cdot t_0}{s^2}$$

Die Grösse dieses ζ_0 -Wertes ist massgebend für die Stärke eines Thermoschocks. Je kleiner der ζ_0 -Wert, desto stärker der Thermoschock und desto höher auch die daraus resultierenden Thermoschockspannungen.

Der Ausdruck $\zeta_0 \frac{at}{s^2}$ ist die **Fourierzahl**.

Diese Kennzahl ist bestimmend für die Ähnlichkeit bei nichtstationärer Wärmeleitung. Im Fall der ebenen Wand spielt sich z.B. bei der halben Wandstärke ein Temperaturausgleichsvorgang 4 mal schneller ab.

4. Bestimmung der Thermoschockspannungen.

für einen beliebigen Zeitpunkt
Ist die Temperaturverteilung in der Wand bekannt, so erhält man die ihr entsprechende Spannungsverteilung aus der Differenz der Temperatur $T(x, t)$ an der Stelle x und dem Flächenmittel der Temperatur $T_m(t)$. Die Beziehung lautet:

(4)
$$\sigma_{\text{Schock}} = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \nu} (T(x, t) - T_m(t))$$

mit E - Elastizitätsmodul [Kp/mm²]
 α - Linearer Wärmedehnungskoeffizient [1/°C]
 ν - Querszahl (Stahl $\nu \approx 0,3$)
 $T_m(t)$ - Flächenmittel der Temperatur zur Zeit t :

(5)
$$T_m(t) = \int_{x=0}^{x=s} T(x, t) \cdot dx$$

Für die dimensionslosen Koordinaten lautet dieses Flächenmittel:

(6)
$$T_m(\zeta) = \int_{\zeta=0}^{\zeta=1,0} T(\zeta, \zeta) \cdot d\zeta$$

Das Flächenmittel der Temperatur entspricht der tatsächlich sich einstellenden thermischen Dehnung der Platte. Vorausgesetzt ist dabei:

- a) Verhinderung einer Verbiegung der Platte.

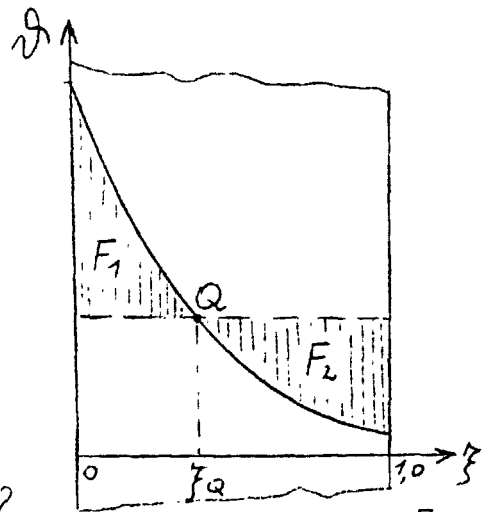


Abb:2

- b) Keine Einleitung von Kräften in Richtung der Plattenebene an den Enden der Platte bzw. längs der Plattenflächen.

Die in einer Querschnittsfläche herrschenden Spannungen müssen also ein Gleichgewichtssystem bilden. Wir haben in diesem Falle also, wenn F die Querschnittsfläche bedeutet

$$\int_{(F)} \sigma \cdot dF = 0$$

Da es sich um eine ebene Wand handelt, gilt nach Abb.2 weiter:

$$F_1 = F_2$$

Abb.2 entspricht einem Aufheizschock: auf der Kühlmittel-seite sind Druckspannungen, auf der isolierten Seite Zugspannungen.

Der entsprechende Abkühlschock wird durch eine Spiegelung an der ξ -Achse dargestellt: Druck- und Zugspannungen sind dabei gegenüber dem Aufheizschock vertauscht.

Für die Beurteilung eines Thermoschocks ist die grösste auftretende Thermoschockspannung maßgebend. Aus dem Temperaturverlauf über den Querschnitt (s. Abb.2) ist ohne weiteres abzulesen, dass diese grösste Thermoschockspannung an der Wandoberfläche auftritt, an der das Kühlmittel den Schock einleitet ($\xi=0$).

Wie weiter unten noch an Hand der entsprechenden Formel erläutert wird, erreicht die Thermoschockspannung zur Zeit t_0 bzw. ζ_0 ihren Größtwert, d.h. genau zu dem Zeitpunkt, an dem der lineare Temperaturanstieg in die horizontale Temperaturrampe übergeht.

Die Gleichung (4) lautet für diese grösste auftretende Thermoschockspannung

(7)

$$\sigma_{max} = \frac{\alpha \cdot E}{1-\nu} (T_i - T_m(t_0))$$

Mit der in Abb.3 angegebenen Umformung wird daraus :

$$(8) \quad \sigma_{max} = \frac{\alpha E}{1-\nu} \Delta T_0 \cdot f_0$$

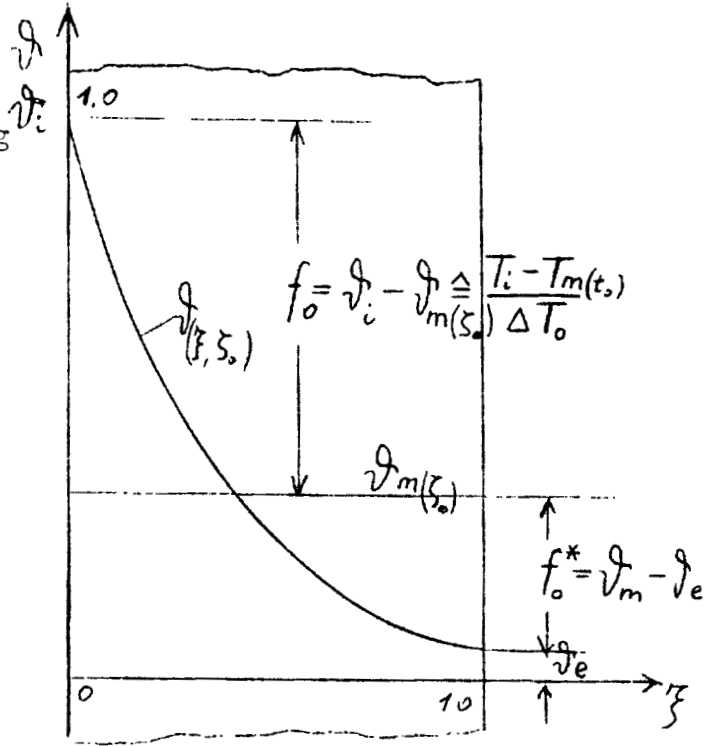


Abb.:3

Der Spannungsfaktor f_0 wird wie aus Abb.3 und Gleichung(6) ersichtlich ist:

$$(9) \quad f_0 = 1 - v_m(zeta_0) \quad f_0 = 1 - \int_{\xi=0}^{\xi=1,0} v(\xi, zeta_0) \cdot d\xi$$

Gleichung (1) in Gleichung (9) eingesetzt ergibt nach der Integration:

$$(10) \quad f_0 = \frac{1}{zeta_0} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{32}{\pi^4} \cdot \frac{1}{(2n-1)^4} \left(1 - e^{-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 zeta_0} \right)$$

Dieser Spannungsfaktor entspricht also der Thermoschockspannung zur Zeit $zeta_0$ an der Stelle $\xi=0$. Für den ξ -Bereich $0 \leq \xi \leq zeta_0$ wird der Spannungsfaktor für dieselbe Stelle:

$$f(\xi) = \frac{\xi}{zeta_0} - \int_{\xi=0}^{\xi=1,0} v(\xi, \xi) d\xi$$

Mit Gleichung (1) und (6) wird daraus:

$$(11) \quad f(\xi) = \frac{1}{zeta_0} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{32}{\pi^4} \cdot \frac{1}{(2n-1)^4} \left(1 - e^{-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 \xi} \right)$$

Diese Gleichung zeigt, dass die grösste Thermoschockspannung tatsächlich zur Zeit ζ_0 auftritt.

Für $\zeta_0 > 2,0$ erreicht $f(\zeta)$ bereits bei $\zeta \approx 2,0$ näherungsweise seinen Höchstwert und bleibt dann praktisch bis ζ_0 konstant, da das e-Glied wegen der Grösse der negativen Potenz praktisch keinen Beitrag mehr liefert.

Gleichung (10) wurde für den ζ_0 -Bereich $10^{-3} \div 10$ mit einem Rechenprogramm ausgewertet. Wegen der guten Konvergenz brauchten dabei nur wenige Glieder berücksichtigt zu werden. Die sich ergebende Beziehung zwischen dem Spannungsfaktor f_0 und ζ_0 ist in Abb.6 in Diagrammform wiedergegeben.

5. Temperaturänderungsgeschwindigkeit.

Wie oben schon angeführt wird für $\zeta_0 > 2,0$ die maximale Schockspannung praktisch schon zur Zeit $\zeta \approx 2,0$ erreicht.

Aus Gleichung (10) wird:

$$(12) \quad f_0 \approx \frac{1}{3 \cdot \zeta_0}$$

Für die Temperaturverteilung in der Wand bedeutet dies, dass die Temperaturkurven im Zeitabschnitt $\zeta \approx 2,0$ bis ζ_0 sehr genau parallel verlaufen ("Quasistationärer" Temperaturverteilungszustand, s. Abb. 4).

Einsetzen von Gleichung (12) in Gleichung (8) ergibt:

$$\sigma_{max} = \frac{\alpha \cdot E}{1-\nu} \cdot \Delta T_0 \cdot \frac{1}{3\zeta_0} = \frac{\alpha E}{1-\nu} \Delta T_0 \frac{s^2}{3 \cdot a \cdot t_0}$$

Die Temperaturgeschwindigkeit ist hierin:

$$k = \frac{\Delta T_0}{t_0}$$

Hiermit ergibt sich die maximale Wärmespannung zu

$$(13) \quad \sigma_{max} = \frac{\alpha \cdot E \cdot s^2 \cdot k}{3(1-\nu)a}$$

Steigt die Kühlmitteltemperatur bis zur Zeit ζ_0 an und bleibt dann konstant, so gilt Gleichung (13) nur für $\zeta_0 > 2,0$. Liegt hingegen ein linearer Temperaturanstieg vor, der nicht vor der Zeit $\zeta \approx 2,0$ endet, so gilt Gleichung (13) allgemein.

In [4] wird zur praktischen Verwendung eine dimensionslose Kenngrösse A für den Aufheiz- bzw. Abkühlvorgang gebildet. Die Thermoschockspannung wird hierzu auf eine den Werkstoff kennzeichnende Spannung - etwa die Fließgrenze - bezogen: Aus (13) wird dadurch:

$$(14) \quad A = \frac{\alpha \cdot E \cdot s^2 \cdot k}{3(1-\nu)a \cdot \sigma_F}$$

Der Wert $A=1$ bedeutet dann, dass die maximale Schockspannung an der Oberfläche gerade den Wert σ_F erreicht.

6.) Thermoschockspannungen an der isolierten Wandseite ($\xi=1,0$)

Es wurde bis jetzt die grösste Thermoschockspannung untersucht, die im Verlauf eines Thermoschocks auftreten kann. Die Spannung über den Querschnitt der Wand nimmt von dieser Maximalspannung an der Stelle $\xi=0$ ab bis sie an der Stelle ξ_a (s. Abb. 2) den Wert 0 erreicht und hier ihr Vorzeichen ändert und wieder bis zur Stelle $\xi=1,0$ ansteigt. Diese Spannung an der isolierten Wandseite ist aber, wie aus dem Temperaturverlauf schon ersichtlich ist, immer kleiner als die Spannung an der Stelle $\xi=0$.

Bei Berechnung der Spannung auf der isolierten Wandseite tritt in Gleichung (8) an Stelle von f_0 der Spannungsfaktor f^* . In Diagramm Abb. 6 ist dieser Spannungsfaktor für die Zeit ζ_0 gezeichnet.

Nach Abb. 3 wurde gesetzt:

$$f_{\zeta=\zeta_0}^* = f_0^*$$

Der Spannungsfaktor f_0^* entspricht im ζ_0 -Bereich, der mit ungefähr $\zeta_0 \approx 0,2$ beginnt, der grössten auf der isolierten Wandseite auftretenden Spannung. Für $\zeta_0 < 0,2$ tritt die maximale Spannung bei $\zeta = 1,0$ nicht mehr zur Zeit ζ_0 auf, sondern - wie auch aus der Temperaturverteilung beim scharfen Thermo-Schock zur Zeit ζ_0 (z.B. $\zeta_0 = 0,01$ in Abb.5) ersichtlich ist - erst zu einem späteren Zeitpunkt. Für $\zeta_0 = 0,01$ z.B. wurde in einer besonderen Rechnung, auf deren Wiedergabe hier verzichtet werden soll, der maximale Spannungsfaktor $f^* = 0,32$ ermittelt; er erscheint zur Zeit $\zeta = 0,15$.

7. Aufbau und Anwendung der Thermoschock-Nomogramme.

Die Beziehung für die maximale Thermoschockspannung (Gl.8) wird in Abb.7 und Abb.8 in Nomogrammform wiedergegeben. Hierdurch erhält man schnell und auf einfache Weise einen Überblick über die die Thermoschockspannung bestimmenden Grössen.

Den Nomogrammen wurden Werkstoffkennwerte zugrunde gelegt, wie sie für den austenitischen Stahl AISI-Nr.304 gelten.

Elastizitätsmodul	$E = 2 \cdot 10^6 \text{ Kp/cm}^2$
Spez. Wärme	$C = 0,12 \text{ cal/g.}^\circ\text{C}$
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda = 0,04 \text{ cal/cm.sec.}^\circ\text{C}$
Linearer Ausdehnungs- Koeffizient	$\alpha = 16 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Wärmeleitwert	$a = 0,042 \text{ cm}^2/\text{sec}$

Für andere Kennwerte sind in den Nomogrammen Korrekturfaktoren ($\gamma_E, \gamma_\alpha, \gamma_a$) angegeben. Die Werkstoffkennwerte sind im allgemeinen temperaturabhängig; um dies bei der Rechnung zu berücksichtigen, verwendet man die Werte, die der mittleren Temperatur entsprechen.

Um die Handhabung der beiden Nomogramme zu erleichtern, wurden zwei praktische Beispiele eingezeichnet.

8. Prakt.Rechenbeispiel.

Ermittelt werden soll die maximale Thermoschockspannung, die in einer Rohrleitung (dünnwandig!) auftritt, wenn das Natrium innerhalb 30 sec seine Temperatur um 120°C erhöht. (von 440°C bis 560°).

Kennwerte des Werkstoffes für die mittlere Schocktemperatur 500°C:

		10CrMoNb9 10
Elastizitätsmodul	$E = 16\,500$	$\left[\frac{\text{kp}}{\text{mm}^2} \right]$
Dichte	$\rho = 7,8$	$\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda = 0,075$	$\left[\frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$
Linearer Ausdehnungs- Koeffizient	$\alpha = 13,9 \cdot 10^{-6}$	$\left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$
Spez. Wärme	$c = 0,11$	$\left[\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$

Daraus bestimmt sich die Temperaturleitzahl

zu

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = 0,087 \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{sec}} \right]$$

Die Kennziffer ζ_0 wird für die Aufheizdauer

$$t_0 = 30 \text{ sec}$$

und für die Wandstärke $s = 15 \text{ mm}$ nach Gleichung (3):

$$\zeta_0 = 1,16$$

Aus Abb.6 entnimmt man den zugehörigen Spannungsfaktor

$$f_0 = 0,27$$

Mit Gleichung (8) erhält man damit die grösste auftretende Thermoschockspannung zu:

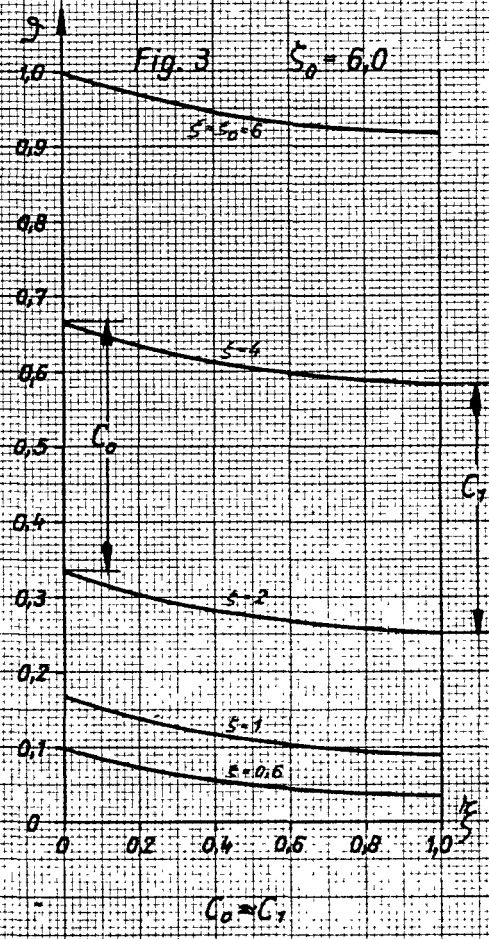
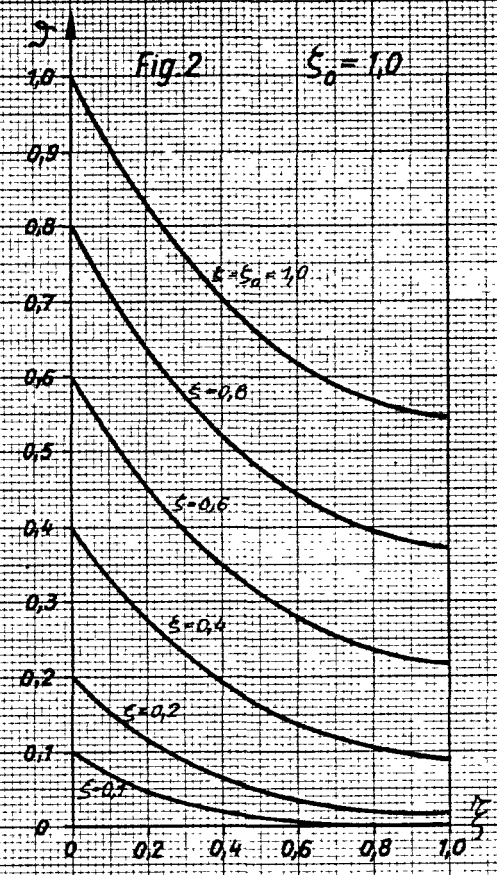
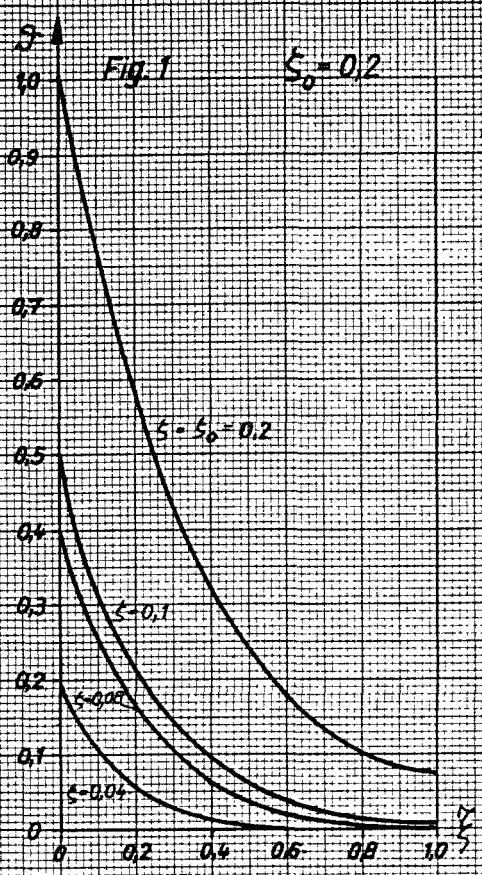
$$\sigma_{max} = \frac{13,9 \cdot 10^{-6} \cdot 16 \cdot 500}{0,7} \cdot 120 \cdot 0,27$$

$$\underline{\sigma_{max} = 10,6 \text{ kp/mm}^2}$$

Literaturverzeichnis.

- 17 Carslaw and J.C.Jaeger
"Conduction of Heat in Solids"
Oxford Clarendon Press 1959, 2.Aufl.
- 27 Troltenier, U.,
"Aufheiz- und Abkühlvorgänge"
aus Allg.Wärmetechnik 1955 H.5/6
- 37 L.F.Coffin, Ir.and R.J.Fritz
"Thermal Stress and Thermal Stress fatigue"
Liquid-Metals Handbook
Navexos-P-733 (Rev.); TID 5277
- 47 L. Böswirth
"Eine dimensionslose Kenngrösse für die
Wärme-Spannungen bei linearen Aufheiz-
und Abkühlvorgängen."
VDI-Z.(1962)Nr.5

Temperaturausgleich über Wandstärke für verschiedene ξ_0 .



Ausdruck für dimensionlose Zeit:

$$\xi_0 = \frac{a \cdot t_0}{s^2}$$

a - Wärmeleitzahl $\left[\frac{\text{cm}^2}{\text{sec}} \right]$

$$\left(a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \right)$$

t_0 Dauer des linearen Temp. Anstieges [sec]

s Wandstärke [cm]

ξ bezogene Wandstärke $\left(\frac{x}{s} \right)$

Abb. 4

Temperaturverlauf nach der Zeit ξ_0
(für verschieden große ξ_0)

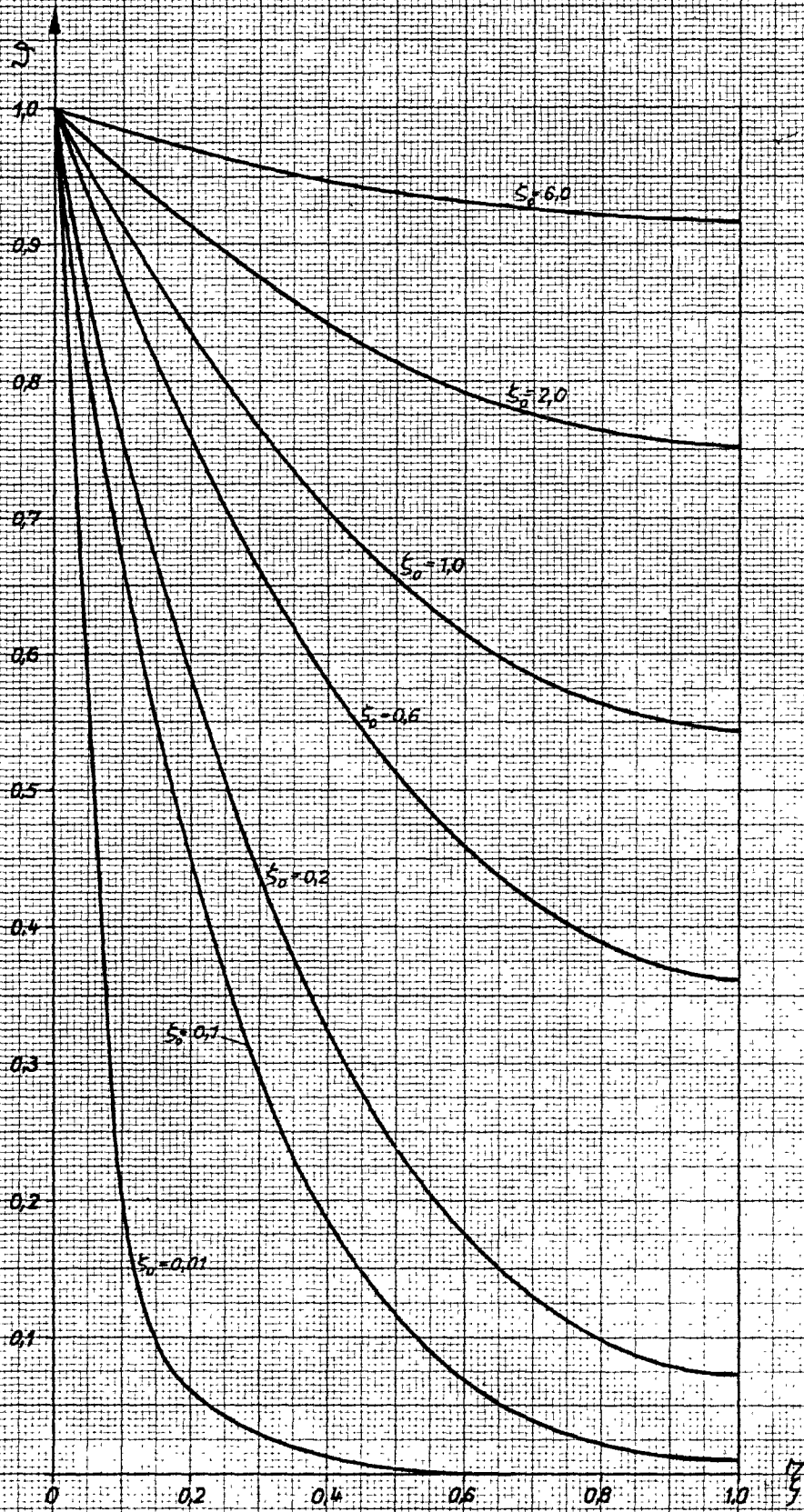
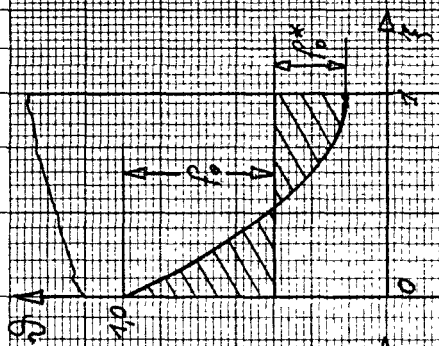
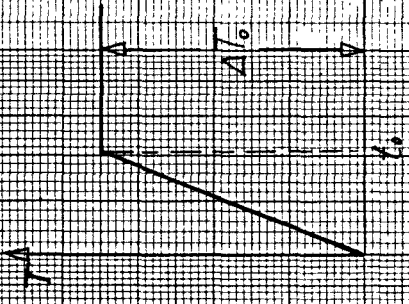


Abb. 5

Thermoschock
Spannungen

$$\zeta = 0: \quad \sigma = \frac{\alpha E}{1-\nu} \Delta T_0 \cdot f_0$$

$$\zeta = 1: \quad \sigma = \frac{\alpha E}{1-\nu} \Delta T_0 \cdot f_0^*$$



$$f_0 = \frac{\alpha \cdot t_0}{s^2}$$

$$f_0^* = \frac{\lambda}{\rho \cdot c \cdot s}$$

Spannungsfaktoren f_0 und f_0^*

α Temperaturleitfähigkeit

λ Wärmeleitfähigkeit

ρ Dichte

c Spez. Wärme

t_0 Dauer des Temp. Anstieges

s Wandstärke

$\left[\frac{\text{cm}^2}{\text{sec}} \right]$

$\left[\frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{grad}} \right]$

$\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$

$\left[\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{grad}} \right]$

$[\text{sec}]$

$[\text{cm}]$

10^{-2}

10^{-1}

10^0

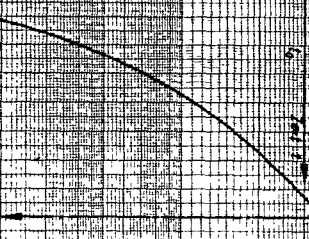
$5 \cdot 10^1$

Abb. 6

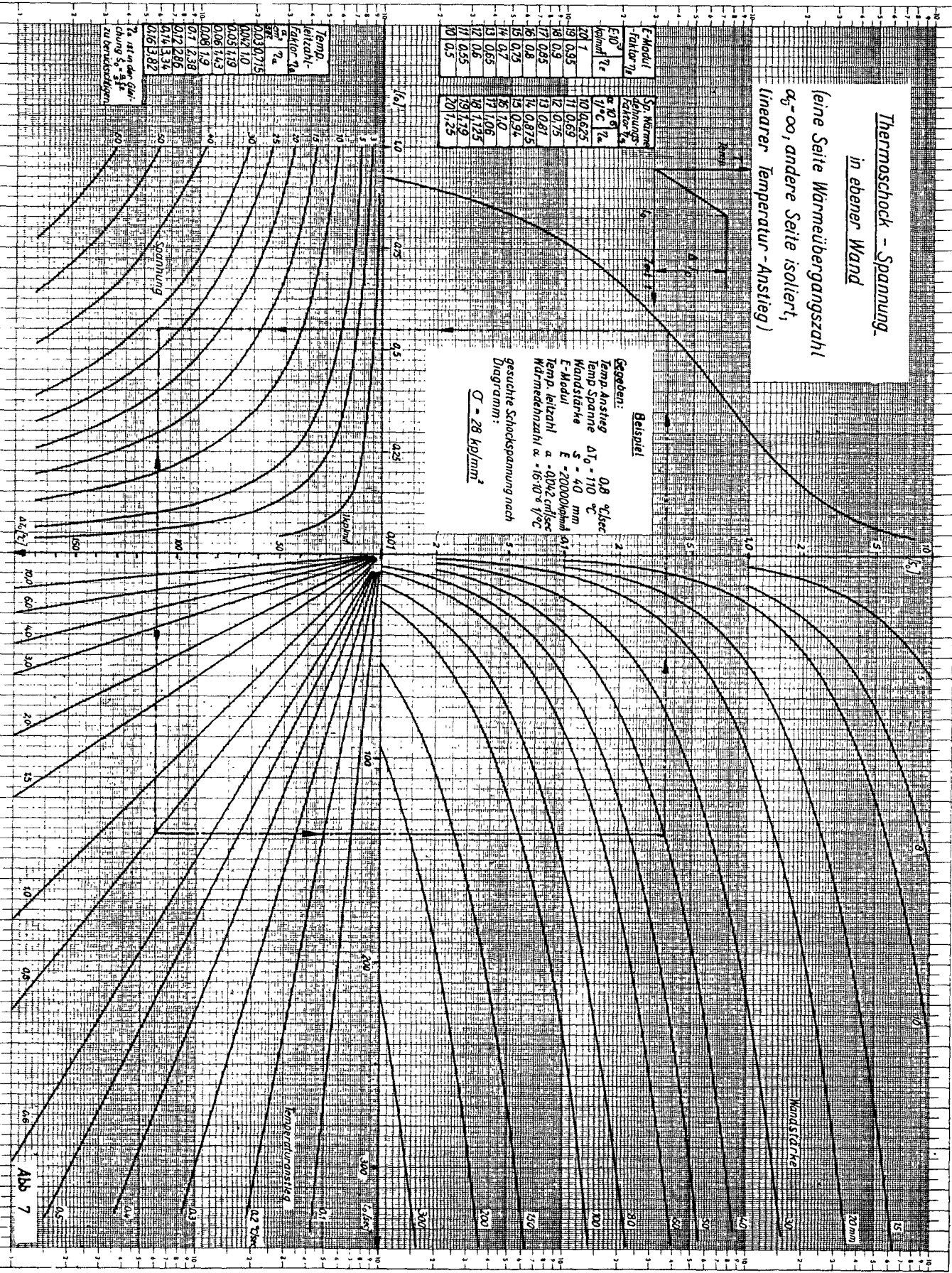
Thermoschock - Spannung, in ebener Wand

(eine Seite Wärmeübergangszahl
 $\alpha_0 = \infty$, andere Seite isoliert,
linearer Temperatur-Anstieg)

E-Modul E [10 ¹¹ N/mm ²]	Sp. Wärme- dehnungs- koeffizient μ [1/°C]
20	10,625
19	11,069
18	12,075
17	13,081
16	14,0875
15	15,094
14	16,100
13	17,106
12	18,1125
11	19,119
10	20,125



Beispiel
 Gegeben: $\Delta T_0 = 110$ °C
 Temp-Anstieg $\Delta T_0 = 110$ °C
 Temp-Spanne $S = 40$ mm
 Wandstärke $E = 20000$ N/mm²
 E-Modul $\mu = 0,002$ 1/°C
 Temp. leitzahl $\alpha = 16 \cdot 10^{-6}$ 1/°C
 Wärmeleitfähigkeit $\alpha = 16 \cdot 10^{-6}$ 1/°C
 gesuchte Schockspannung nach
 Diagramm:
 $\sigma = 28$ kg/mm²

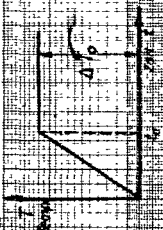


Temp. leitzahl μ [1/°C]	Temp. leitzahl μ [1/°C]
0,030715	0,030715
0,03119	0,03119
0,03167	0,03167
0,03215	0,03215
0,03263	0,03263
0,03311	0,03311
0,03359	0,03359
0,03407	0,03407
0,03455	0,03455
0,03503	0,03503
0,03551	0,03551
0,03599	0,03599
0,03647	0,03647
0,03695	0,03695
0,03743	0,03743
0,03791	0,03791
0,03839	0,03839
0,03887	0,03887
0,03935	0,03935
0,03983	0,03983
0,04031	0,04031
0,04079	0,04079
0,04127	0,04127
0,04175	0,04175
0,04223	0,04223
0,04271	0,04271
0,04319	0,04319
0,04367	0,04367
0,04415	0,04415
0,04463	0,04463
0,04511	0,04511
0,04559	0,04559
0,04607	0,04607
0,04655	0,04655
0,04703	0,04703
0,04751	0,04751
0,04799	0,04799
0,04847	0,04847
0,04895	0,04895
0,04943	0,04943
0,04991	0,04991
0,05039	0,05039
0,05087	0,05087
0,05135	0,05135
0,05183	0,05183
0,05231	0,05231
0,05279	0,05279
0,05327	0,05327
0,05375	0,05375
0,05423	0,05423
0,05471	0,05471
0,05519	0,05519
0,05567	0,05567
0,05615	0,05615
0,05663	0,05663
0,05711	0,05711
0,05759	0,05759
0,05807	0,05807
0,05855	0,05855
0,05903	0,05903
0,05951	0,05951
0,05999	0,05999
0,06047	0,06047
0,06095	0,06095
0,06143	0,06143
0,06191	0,06191
0,06239	0,06239
0,06287	0,06287
0,06335	0,06335
0,06383	0,06383
0,06431	0,06431
0,06479	0,06479
0,06527	0,06527
0,06575	0,06575
0,06623	0,06623
0,06671	0,06671
0,06719	0,06719
0,06767	0,06767
0,06815	0,06815
0,06863	0,06863
0,06911	0,06911
0,06959	0,06959
0,07007	0,07007
0,07055	0,07055
0,07103	0,07103
0,07151	0,07151
0,07199	0,07199
0,07247	0,07247
0,07295	0,07295
0,07343	0,07343
0,07391	0,07391
0,07439	0,07439
0,07487	0,07487
0,07535	0,07535
0,07583	0,07583
0,07631	0,07631
0,07679	0,07679
0,07727	0,07727
0,07775	0,07775
0,07823	0,07823
0,07871	0,07871
0,07919	0,07919
0,07967	0,07967
0,08015	0,08015
0,08063	0,08063
0,08111	0,08111
0,08159	0,08159
0,08207	0,08207
0,08255	0,08255
0,08303	0,08303
0,08351	0,08351
0,08399	0,08399
0,08447	0,08447
0,08495	0,08495
0,08543	0,08543
0,08591	0,08591
0,08639	0,08639
0,08687	0,08687
0,08735	0,08735
0,08783	0,08783
0,08831	0,08831
0,08879	0,08879
0,08927	0,08927
0,08975	0,08975
0,09023	0,09023
0,09071	0,09071
0,09119	0,09119
0,09167	0,09167
0,09215	0,09215
0,09263	0,09263
0,09311	0,09311
0,09359	0,09359
0,09407	0,09407
0,09455	0,09455
0,09503	0,09503
0,09551	0,09551
0,09599	0,09599
0,09647	0,09647
0,09695	0,09695
0,09743	0,09743
0,09791	0,09791
0,09839	0,09839
0,09887	0,09887
0,09935	0,09935
0,09983	0,09983
1,00031	1,00031
1,00079	1,00079
1,00127	1,00127
1,00175	1,00175
1,00223	1,00223
1,00271	1,00271
1,00319	1,00319
1,00367	1,00367
1,00415	1,00415
1,00463	1,00463
1,00511	1,00511
1,00559	1,00559
1,00607	1,00607
1,00655	1,00655
1,00703	1,00703
1,00751	1,00751
1,00799	1,00799
1,00847	1,00847
1,00895	1,00895
1,00943	1,00943
1,00991	1,00991
1,01039	1,01039
1,01087	1,01087
1,01135	1,01135
1,01183	1,01183
1,01231	1,01231
1,01279	1,01279
1,01327	1,01327
1,01375	1,01375
1,01423	1,01423
1,01471	1,01471
1,01519	1,01519
1,01567	1,01567
1,01615	1,01615
1,01663	1,01663
1,01711	1,01711
1,01759	1,01759
1,01807	1,01807
1,01855	1,01855
1,01903	1,01903
1,01951	1,01951
1,02000	1,02000

Das Abbildungen sind von 1 bis 100000 Entwerfer 20 mm der vertikalen Maßstab in mm

Abb 7

Thermoschock - Spannung in ebener Wand

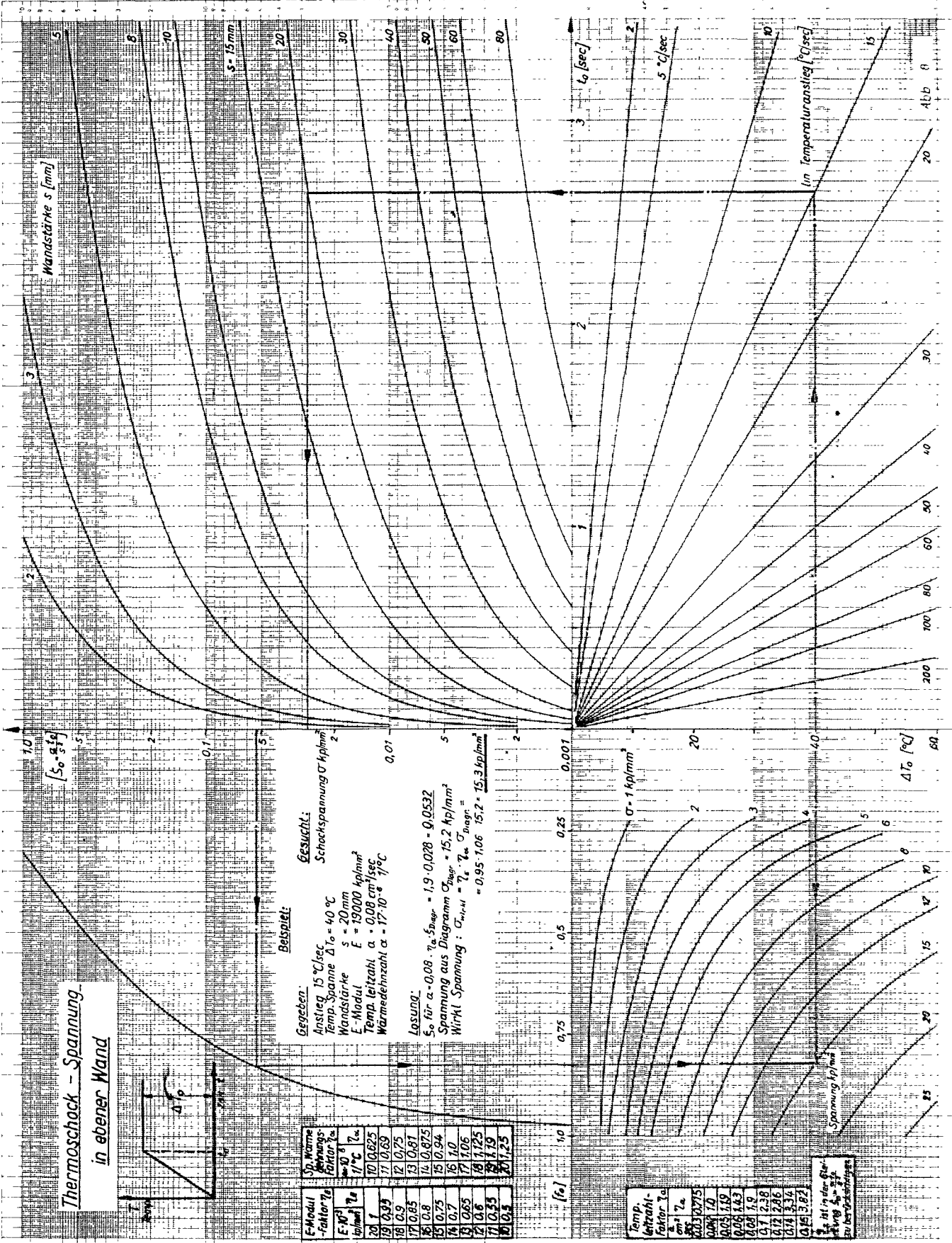


E-Modul Faktor γ_E	Sp. Wärme Faktor γ_s
10	10
20	20
30	30
40	40
50	50
60	60
70	70
80	80
90	90
100	100

Gegeben:
Anstieg $15^\circ/\text{sec}$
Temp. Spanne $\Delta T_0 = 40^\circ\text{C}$
Wandstärke $s = 20\text{ mm}$
E-Modul $E = 19000\text{ kp/mm}^2$
Temp. leitzahl $\alpha = 0.08\text{ cm}^2/\text{sec}$
Wärmeleitzahl $\alpha = 17 \cdot 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

BESUCHT:
Schockspannung $\sigma\text{ (kp/mm}^2\text{)}$

Beispiel:
Lösung:
 ϵ_s für $\alpha = 0.08$, $\gamma_E = 10$, $\gamma_s = 10$, $\Delta T_0 = 40^\circ\text{C}$
Spannung aus Diagramm $\sigma_{\text{Weg}} = 15.2\text{ kp/mm}^2$
Wirkl. Spannung: $\sigma_{\text{Wirkl}} = \gamma_E \cdot \gamma_s \cdot \sigma_{\text{Weg}} = 0.95 \cdot 106 \cdot 15.2 = 15.3\text{ kp/mm}^2$



Temp. leitzahl Faktor γ_α	Temp. leitzahl Faktor γ_α
10	10
20	20
30	30
40	40
50	50
60	60
70	70
80	80
90	90
100	100

σ ist in der Geraden σ_{Weg} zu berücksichtigen