Zeitschrift: IABSE reports of the working commissions = Rapports des commissions de travail AIPC = IVBH Berichte der Arbeitskommissionen

Band: 21 (1975)

Artikel: Grundlagen zur theoretischen Bestimmung des Feuerwiderstandes von biegesteifen Stahlstabwerken

Autor: Mehl, Friedrich / Arndt, Wolfram

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-18797

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Grundlagen zur theoretischen Bestimmung des Feuerwiderstandes von biegesteifen Stahlstabwerken

Basis to the Theoretical Determination of Fire Resistance of Rigid Steel Frames

Bases pour la détermination théorique de la résistance au feu de cadres métalliques rigides

Friedrich MEHL Wolfram ARNDT
Dr.-Ing. Dr.-Ing.
Ministerium für Bauwesen, Staatliche Bauaufsicht
Leipzig, DDR

1. EINLEITUNG

Die theoretische Ermittlung des Feuerwiderstandes von Stahlkonstruktionen gliedert sich prinzipiell in zwei Hauptaufgaben. Zunächst muß die kritische Stahltemperatur, d.h. die Temperatur bei der das Tragvermögen des Stahlbauelementes in Abhängigkeit der maßgebenden Faktoren - des Verhältnisses von vorhandener Stahlspannung zum Zeitpunkt des Versagens zu maximal zulässiger und infolge der Schnittkraftumlagerung bei Erwärmung der Konstruktion auch in Abhängigkeit des statischen Systems, der Stahlgüte und der Profilform - erschöpft ist, bekannt sein. Ist dieser Wert gegeben, so folgt aus der Berechnung der zeitabhängigen Erwärmung der Konstruktion bei vorgegebener Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve als Ausdruck der Brandlast und des Lüftungsverhältnisses im Brandraum als Funktion der Profilform und einer gegebenenfalls vorhandenen Bekleidung der Stahlkonstruktion die Zeit bis zum Erreichen der kritischen Temperatur. Damit ist der Feuerwiderstand der Konstruktion bestimmt.

Aus statischer Sicht stellt sich somit die theoretische Feuerwiderstandsermittlung als ein Grenzlastproblem dar. Der Unterschied zum üblichen Grenzlastproblem der Baustatik unter Normaltemperatur sowie der Grundgedanke der theoretischen Feuerwiderstandsermittlung besteht darin, daß zum Zeitpunkt des Erreichens der Feuerwiderstandsgrenze die äußere gegebene Belastung des Systems der Grenzlast entspricht und die kritische Temperatur sowie der zugehörige elastisch-plastische Bruchmechanismus für diesen Zeitpunkt gesucht sind.

Versagt das Tragwerk durch den Abfall der Fließgrenze mit der Temperaturerhöhung , so liegt ein temperaturabhängiges Spannungsproblem vor. Treten andererseits indifferente Gleichgewichtszustände infolge Temperaturerhöhung im Tragwerk auf, so liegt ein temperaturabhängiges Stabilitätsproblem vor. Da die plastischen Eigenschaften des Stahls bzgl. des Tragverhaltens der Querschnitte

eines Stabtragwerkes unter Brandbeanspruchung mit in die Betrachtung einzubeziehen sind , ist sowohl das temperaturabhängige Spannungsproblem als auch das temperaturabhängige Stabilitätsproblem als Traglastuntersuchung zu behandeln.

2. TEMPERATURABHÄNGIGES SPANNUNGSPROBLEM

Unter der Vorraussetzung einer linearen Änderung der Fließgrenze der Massenbaustähle mit der Temperatur, der Annahme plastischer Gelenke an den versagenden Querschnitten eines brandbeanspruchten Stahlstabwerkes, der Voraussetzung mindestens einfach symmetrischer Querschnitte, deren eine Hauptachse identisch der Spur der Lastebene ist (Ausschluß zweiachsiger Biegung und Torsion), sowie einer reinen Biegemomentenbeanspruchung bestimmt sich die kritische Stahltemperatur zu :

$$T_{KR}^{M} = T'_{KR} - \frac{a}{f} \cdot \frac{\sigma_F(\ T_{KR}^{M}\ )'}{\sigma_{ZUL}} \qquad (\ 1\ )$$

T_{KR}^{M} = Kritische Stahltemperatur unter theoretisch reiner Momentenbeanspruchung des versagenden Querschnittes in ^{o}C

T'_{KR} = Kritische Stahltemperatur eines theoretisch unbelasteten Stahlstabwerkes in ^{o}C

σ_{ZUL} = Zulässige Stahlspannung in kp/cm^2

a = σ_{ZUL}/k in kp/cm^2

k = Anstieg der Gleichung der linearen Änderung der Fließgrenze mit der Temperatur

f = Formbeiwert = W_p/W

W_p = Plastisches Widerstandsmoment in cm^3

W = Elastisches Widerstandsmoment in cm^3

$\sigma_F(T_{KR}^{M})'$ = Temperaturabhängige Fließgrenze für den Zeitpunkt des Erreichens der kritischen Stahltemperatur bezogen auf das elastische Widerstandsmoment; entspricht der vorhandenen Stahlspannung am versagenden Querschnitt zum Zeitpunkt des Erreichens der Feuerwiderstandsgrenze bezogen auf das elastische Widerstandsmoment

= M_{KR}/W

M_{KR} = Kritisches Schnittmoment bzw. volles plastisches Moment des versagenden Querschnittes für den Zeitpunkt $T = T_{KR}^{M}$

T = Temperatur

Die Bestimmung des kritischen Schnittmomentes bzw. des vollen plastischen Momentes für den Zeitpunkt des Erreichens der kritischen Stahltemperatur erfolgt mit Hilfe der einfachen plastischen Theorie.

Die Gleichung 1 kann durch eine entsprechende Aufbereitung dahingehend erweitert werden, daß sie nach Einschaltung von Einflußfaktoren auch für statische Systeme bei gleichzeitiger Wirkung von Biegemomenten, Normalkräften und Querkräften sowie ggf. vorhandener Wärmespannungen anwendbar ist /1/ /2/ . Der Quer- und Längskrafteinfluß wird dabei durch fiktive bezogene volle plastische Momente iterativ berücksichtigt.

Der Wert für T'_{KR} folgt aus der Bedingung für

$$T = T'_{KR} \quad \text{ist} \quad \sigma = \sigma_F(T) = 0 \qquad (2)$$

σ = Spannung in kp/cm^2
$\sigma_F(T)$ = Temperaturabhängige Fließgrenze in kp/cm^2

Für die Massenbaustähle ST 38 und ST 52 können für eine erste Näherung die folgenden Beziehungen für die temperaturabhängige Fließgrenze $\sigma_F(T)$, die temperaturabhängige Proportionalitätsgrenze $\sigma_P(T)$ und für den temperaturabhängigen Elastizitätsmodul $E(T)$ angesetzt werden.

Für ST 38 :
$\sigma_F(T) = 2400 - 4{,}00 \cdot T$
$\sigma_P(T) = 1920 - 3{,}85 \cdot T$

Für ST 52 :
$\sigma_F(T) = 3600 - 5{,}14 \cdot T$
$\sigma_P(T) = 2880 - 5{,}24 \cdot T$

Für ST 38 und ST 52 :
$E(T) = 2100000 - 1615 \cdot T$ (3)

Mit $\sigma_F(T)$, $\sigma_P(T)$ und $E(T)$ in kp/cm^2 und T in ^oC .

Unter Zugrundelegung der Beziehungen (3) wird für die kritische Stahltemperatur T'_{KR} und den Anstieg k :

Für ST 38 $T'_{KR} = 600\ ^oC$; $k = 4{,}00$
Für ST 52 $T'_{KR} = 700\ ^oC$; $k = 5{,}14$

3. TEMPERATURABHÄNGIGES STABILITÄTSPROBLEM

Zur Erfassung des temperaturabhängigen Stabilitätsproblems eignet sich die Anwendung des Spannungsproblems nach Theorie II. Ordnung gemäß der Lösung nach /3/ , vgl. auch /4/ . Für die theoretische Erfassung werden die nachstehenden grundlegenden Voraussetzungen getroffen :

- Maßgebend sei die Biegeknickung, d.h. zum Zeitpunkt des Erreichens der kritischen Stahltemperatur entspricht die vorhandene Stahlspannung der temperaturabhängigen kritischen Spannung $\sigma_{KS}(T)$ nach Theorie II. Ordnung .
- Infolge der guten Wärmeleiteigenschaften des Stahles und kleiner Profildicken liegt eine gleichmäßige Temperaturverteilung über den gesamten kritischen Querschnitt bzw. in den maßgebenden Querschnittsbereichen des Biegeknickstabes vor.
- Die Wärmespannungen infolge behinderter Wärmedehnungen sind vernachlässigbar klein /2/ .

- Zwischen der kritischen Stahltemperatur und der Auslastung des Querschnittes besteht ein linearer Zusammenhang.
- Für die Bestimmung des Feuerwiderstandes einer Baukonstruktion wird der Lastfall H (Eigengewicht und Verkehrslast) maßgebend.

Damit gilt unter Einführung der kritischen Stahltemperatur $T''_{KR}(\lambda)$ eines planmäßig mittig bis zur zulässigen Druckspannung $_{ZUL}\sigma_c$ belasteten Stabes :

$$T_{KR} = T'_{KR} - \left[T'_{KR} - T''_{KR}(\lambda) \right] \frac{\sigma}{_{ZUL}\sigma_c} \qquad (4)$$

λ = Stabschlankheit

Bei Annahme der temperaturabhängigen Festigkeitskennwerte entsprechend den Beziehungen (3) folgt aus der Gegenüberstellung der temperaturabhängigen kritischen Spannung nach Theorie II. Ordnung mit der zulässigen Druckspannung nach TGL 13503 /3/ im Bereich $10 \leqq \lambda \leqq 275$:

Für ST 38 :
$$T''_{KR}(\lambda) = 200 + 0{,}723 \cdot \lambda - 0{,}76 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda^2 + 0{,}605 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^3 - 0{,}12 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda^4 \qquad (5)$$

Für ST 52 :
$$T''_{KR}(\lambda) = 247 + 1{,}439 \cdot \lambda + 0{,}322 \cdot 10^{-1} \cdot \lambda^2 - 0{,}136 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^3 + 0{,}187 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda^4 \qquad (6)$$

4. ERWÄRMUNGSRECHNUNG

Die Berechnung der Erwärmung erfolgt zweckmäßig mit Hilfe der ideellen Rechengröße α' für unbekleidete Stahlkonstruktionen und der ideellen Rechengröße λ' für bekleidete Konstruktionen analog zu den bekannten Rechenverfahren /5/ /6/ . Dabei sind die Rechengrößen in Auswertung entsprechender Kleinbrandversuche zu gewinnen, d.h. λ' ist eine Funktion der angenommenen Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve und des jeweiligen Bekleidungsmaterials. Sind die ideellen Rechengrößen bestimmt, so kann eine Extrapolation auf beliebige Profilwerte vorgenommen werden. Dabei gilt :

Für unbekleidete Stahlkonstruktionen (7)

$$\Delta T_B(\Delta t_i) = \alpha'(\Delta t_{i-1}) \cdot \frac{F_b}{M} \cdot \frac{1}{c(\Delta t_i)} \cdot \left[T_R(\Delta t_{i-1}) - T_B(\Delta t_{i-1}) \right] \cdot \Delta t_i$$

Für bekleidete Stahlkonstruktionen (8)

$$\Delta T_B(\Delta t_i) = \lambda'(\Delta t_{i-1}) \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{F_b}{M} \cdot \frac{1}{c(\Delta t_i)} \left[T_R(\Delta t_{i-1}) - T_B(\Delta t_{i-1}) \right] \cdot \Delta t_i$$

$\Delta T_B(\Delta t_i)$ = Temperaturzuwachs der Stahlkonstruktion im Zeitintervall Δt_i in grd

$\alpha'(\Delta t_{i-1})$ = Ideelle Rechengröße für unbekleidete Stahlkonstruktionen im Zeitintervall Δt_{i-1} in $kcal/h \cdot m^2 \cdot grd$

$\lambda'(\Delta t_{i-1})$ = Ideelle Rechengröße für bekleidete Stahlkonstruktionen im Zeitintervall Δt_{i-1} in kcal/h·m·grd

F_b/M = Profilfaktor in m^2/kg

$c(\Delta t_i)$ = Spezifische Wärme von Stahl in Abhängigkeit von der Temperatur im Zeitintervall Δt_i in kcal/kg·grd

D = Dicke der Bekleidung in m

$T_R(\Delta t_{i-1})$ = Brandraumtemperatur im Zeitintervall Δt_{i-1} in ^oC

$T_B(\Delta t_{i-1})$ = Temperatur der Stahlkonstruktion im Zeitintervall Δt_{i-1} in ^oC

Δt_i = Zeitintervall "i" in h

Der Profilfaktor stellt im Fall einer unbekleideten Stahlkonstruktion das Verhältnis von energieaufnehmender Oberfläche zu aufzuwärmender Stahlmasse dar; im Fall einer bekleideten Konstruktion ist er das Verhältnis von energieabgebender innerer Oberfläche der Bekleidung zu Stahlmasse.

Die Aufbereitung der hier kurz dargelegten Methode in Form von Diagrammen analog zu der nachstehenden Abbildung 1 ermöglicht dem Praktiker eine rasche und optimale Handhabung. Ein Vergleich der Ergebnisse aus der Erwärmungsrechnung mit Versuchen zeigt eine im Bereich der Toleranzen liegende Übereinstimmung /1/ /2/ /6/ . Bei Annahme der temperaturabhängigen Festigkeitskennwerte nach den Beziehungen (3) liegen die Werte für die kritische Stahltemperatur des temperaturabhängigen Spannungsproblems im allgemeinen unterhalb der Angaben nach BRYL /7/.

5. LITERATURVERZEICHNIS

/1/ Mehl,F. Analytische Bestimmung des Feuerwiderstandes von Stahlkonstruktionen, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig, Heft 2/1972, S. 147 bis 164

/2/ Mehl,F. Arndt,W. Theoretische Bestimmung des Feuerwiderstandes von biegesteifen Stahlstabwerken, erscheint demnächst in der Reihe: Bautechnischer Brandschutz - Aus Forschung und Praxis, Staatsverlag der DDR, Berlin

/3/ TGL 13503 , Stahlbau, Stabilitätsfälle (Knickung, Kippung, Beulung), Berechnung nach zulässigen Spannungen

/4/ Mehl,F. Arndt,W. Der Feuerwiderstand von Stahlstützen, Unser Brandschutz, Ausgabe B, Wissenschaftl.-techn. Beilage Nr. 5/1973, S. 65 bis S.76 ; 23(1973)7

/5/ Rudolph,R. Knublauch, E. Ein Verfahren zur Berechnung der Feuerwiderstandsdauer von Stahlbauteilen, in: VDI-Fortschritt Berichte, Reihe 5, Nr. 10 , 1970

/6/ Arndt,W. Mehl,F. Ermittlung der zeitabhängigen Bauteiltemperatur im Brandfall; Unser Brandschutz, Ausgabe B, 22(1972) 7 , Wissenschaftl.-techn. Beilage Nr. 5/1972, S. 71 bis S. 77

/7/ Bryl,S. Decoppet, J.P. Haueter,O. Berechnung des Brandwiderstandes von Stahlkonstruktionen; Herausgegeben von der Schweizerischen Zentralstelle für Stahlbau, Selbstverlag, Zürich 1970

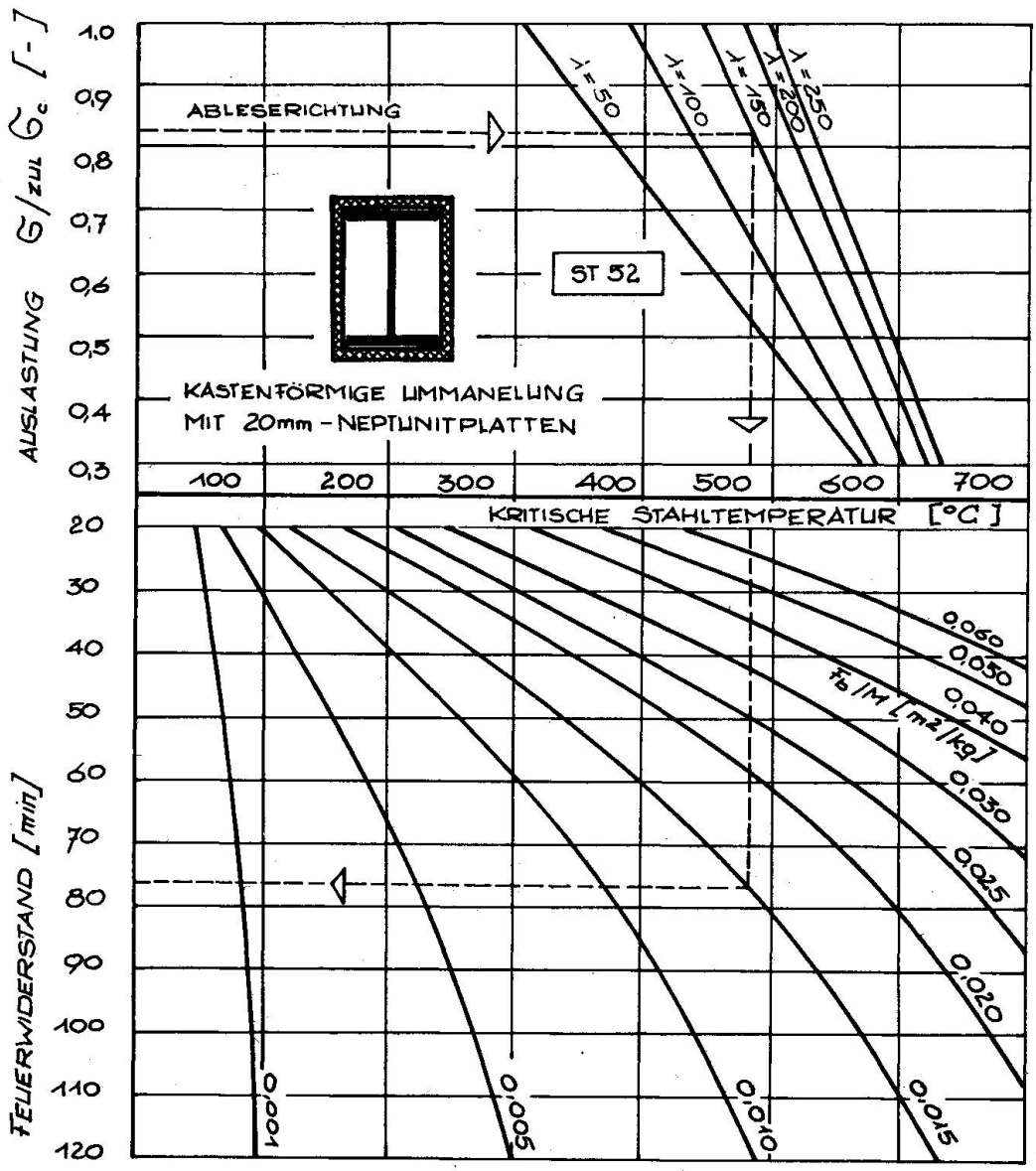

Abb. 1 Der Feuerwiderstand von Druckstäben aus ST 52 mit kastenförmiger Ummantelung aus 20 mm dicken Neptunitplatten

ZUSAMMENFASSUNG

In der vorstehenden Abhandlung werden im Ueberlick Grundlagen für eine theoretische Erfassung der Feuerwiderstandsermittlung von Stahlkonstruktionen dargelegt. Das temperaturabhängige Spannungsproblem wird mit Hilfe der einfachen plastischen Theorie erfasst; das temperaturabhängige Stabilitätsproblem als Spannungsproblem nach Theorie II. Ordnung. Die Berechnung der zeitabhängigen Erwärmung einer Stahlkonstruktion erfolgt mittels ideeller Rechengrössen.

SUMMARY

In this report the basis for a theoretical determination of the fire resistance of steel structures are shown. The tension problem depending on temperature is considered with the simple plastic theory, the stability problem being considered with the Theory of 2nd order. Calculation of heating of a steel structure subject to time results using idealized mathematical values.

RESUME

Ce rapport présente les bases pour une détermination théorique de la résistance au feu de structures métalliques. Le problème des contraintes en fonction de la température est étudié à l'aide de la théorie de la plasticité, celui de la stabilité par une théorie du 2e ordre. Le calcul de l'échauffement d'une construction métallique dans le temps est effectué à l'aide de valeurs mathématiques idéalisées.