

# TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

## Mathematisches Modell einer optimal gesteuerten Abkühlung von Profilstählen in Kühlstrecken

R. Krengel, R. Standke, F. Tröltzsch, H. Wehage

Preprint 98-6



*Fakultät für Mathematik*

# Mathematisches Modell einer optimal gesteuerten Abkühlung von Profilstählen in Kühlstrecken

F. Tröltzsch, R. Standke  
*TU Chemnitz*  
*Fakultät für Mathematik*

H. Wehage  
*Mannesmann Demag Metallurgie*  
*Strangguß und Warmwalzen*

R. Kregel  
*Hoesch H.S.P.*

November 1997

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>2</b>
<b>2 Stand der Technik beim Walzen von Profilen</b>	<b>2</b>
2.1 Temperaturentwicklung und Produktqualität . . . . .	2
2.2 Notwendigkeit der Prozeßbeschreibung . . . . .	4
2.3 Vereinfachte Kühlmodelle . . . . .	5
2.3.1 Beschreibung des Kühlprozesses . . . . .	5
2.3.2 Anwendungsbeispiele und Schlußfolgerungen . . . . .	7
<b>3 Wärmeübergang bei der Spritzwasserkühlung</b>	<b>8</b>
<b>4 Aufbau des mathematischen Modells</b>	
<b>”Optimale Steuerung von Kühlsegmenten”</b>	<b>8</b>
<b>5 Beispielrechnungen</b>	<b>12</b>
5.1 Einfluß wärmetechnischer Stoffkennwerte . . . . .	13
5.2 Einfluß des Freiheitsgrades der Anfangstemperaturverteilung . . . . .	14
5.3 Einfluß unterschiedlicher Gitter . . . . .	14
5.4 Beschränkungen des Temperaturgradienten . . . . .	14
<b>6 Ausblick auf die Weiterentwicklung</b>	<b>15</b>
6.1 Mathematisches Grundmodell . . . . .	15
6.2 Selektion der technisch relevanten Anwendungsfälle durch Beispielrechnungen . . . . .	15

# 1 Zielsetzung

Beim selektiven Kühlen von Profilen in einer Walzstraße besteht die Zielsetzung im Temperatenausgleich zwischen den einzelnen Querschnittsbereichen bei gleichzeitiger Absenkung des Wärmeinhaltes insgesamt. Der technische Hintergrund ist die Realisierung von Voraussetzungen für moderne Walztechnologien, wie dem normalisierenden und thermomechanischen Walzen sowie der Stabilisierung der Materialstruktur im Anschluß an den Walzprozeß bis zum Beginn der Gefügeumwandlung. Eine beschleunigte selektive Abkühlung der Profile nach vollzogener Umwandlung auf Richttemperatur führt zur Reduzierung im Bereich der Kühlbetten bzw. zur Produktionssteigerung bei gleicher Kühlbettgröße.

Die technischen Ziele des selektiven Kühlens von Profilen sind demnach:

- Erhöhung der Walzgutqualität
- Einsparung von Invest- und Betriebskosten
- Erhöhung der Produktion.

Diese Zielstellungen werden je nach Anwendungsfall einzeln oder kombiniert verfolgt.

Da die Fertigprofile und Zwischenprofile sowohl in der Form als auch in der Größe bei gleicher Form variieren, ist die Erarbeitung von Softwarelösungen für die Ermittlung des Temperaturverlaufs eine Grundvoraussetzung für die Auslegung und Konstruktion der Kühlstreckeneinrichtungen. Für die Prozeßkontrolle und -automation müssen optimierte Softwarelösungen bereitgestellt werden. Mit ihrer Hilfe können offline profil- und prozeßabhängige Kühlpläne zur Voreinstellung der Kühlstrecken erstellt werden. Arbeitet ein solches optimiertes Prozeßmodell ausreichend schnell, kann es schließlich für die Online-Steuerung der Kühlstrecken im Zusammenspiel mit geeigneter Temperatur- und Geschwindigkeitsmeßtechnik eingesetzt werden.

## 2 Stand der Technik beim Walzen von Profilen

### 2.1 Temperaturentwicklung und Produktqualität

Formstahl besitzt sowohl bei den gewalzten Fertigprofilen als auch bei den zugehörigen Zwischenquerschnitten auf Grund des Walzprozesses und der Vorgeschichte unterschiedliche Temperaturen in den einzelnen Querschnittsbereichen. Ausgangsquerschnitte für das Walzen sind je nach Endabmessung und Technologie Knüppel, Brammen, stranggegossene Vorprofile und endabmessungsnah vorgegossene Vorprofile. Die Wärmebilanz des Walzgutes wird in der Walzstraße bestimmt durch:

- Kontakt mit den Walzen in den Walzstichen

- Umformwärme infolge geleisteter Arbeit in den Stichen
- Strahlung und Konvektion in den Stichpausen und während der Abkühlung auf dem Kühlbett.

Je nach Form des Ausgangs- und Fertigmaterials, der Walzspaltgeometrie bzw. Umformung einzelner Profilquerschnittsbereiche entstehen unterschiedliche Temperaturen über den Querschnitt. In den Stichpausen gleichen sich diese Temperaturunterschiede durch Wärmeleitung teilweise wieder aus. Strahlung und Konvektion bewirken jedoch in den Stichpausen und im Kühlbettbereich eine ungleichmäßige Abkühlung der einzelnen Querschnittsbereiche auf Grund der jeweiligen Profilgeometrie.

Die Vormaterialqualität sowie die Gefügeausbildung des Stahls während und nach den Walzen beeinflussen maßgebend die mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit, Streckgrenze, Dehnung, Spröbruchübergangstemperatur und Härteverteilung) eines Fertigprofils. Während des Walzens wird die Gefügestruktur von der Temperatur, dem Umformgrad, der Umformgeschwindigkeit und dem Zeitregime des Prozesses bestimmt. Die Veränderung des Walzendgefüges ist während der Abkühlung des Fertigprofils aus der Walzhitze durch die Zeit/Temperatur-Umwandlungscharakteristik des jeweiligen Stahls gekennzeichnet.

Eine gleichmäßige Temperaturverteilung über den Walzgutquerschnitt vor den letzten Stichen durch selektive Kühlung führt zu gleichmäßigeren mechanischen Eigenschaften über den Querschnitt im Vergleich zum konventionellen Walzprozeß ohne selektive Kühlung.

Wird zudem die Temperatur vor den Fertigstichen in den Bereich kurz oberhalb des  $A_{r3}$ -Umwandlungspunktes (GS-Linie, Gebiet des nicht mehr rekristallisierenden Austenits) gleichmäßig abgesenkt, ergeben sich durch das thermomechanische Walzen erhöhte Festigkeitswerte bei guter Zähigkeit [1, 2]. Bild 1 zeigt den Temperaturbereich des konventionellen, des normalisierenden und des thermomechanischen Walzens schematisch in einem Eisen-Kohlenstoff-Diagramm.

Eine besonders intensive Kühlung oberflächennaher Profilquerschnittsbereiche von Walzendtemperaturen über  $1000^{\circ}\text{C}$  unter Martensitstarttemperatur mit nachfolgendem Selbstanlassen an Luft, wie z.B. die Trägerproduktion nach dem QST-Verfahren (Quenching and Self Tempering) [1, 3], führt zu einer Kombination von Anlaßgefüge im Randbereich mit ferritisch/perlitischem Gefüge in den zentralen Querschnittsbereichen von Steg und Flansch der Träger. Diese Gefügekombination ist die Ursache für die Erhöhung der Festigkeit bei guter Zähigkeit. Durch das QST-Verfahren können Legierungselemente eingespart werden, wodurch das Kohlenstoffäquivalent gesenkt und somit die Schweißbarkeit verbessert wird. Ein ähnlicher Prozeß der Intensivkühlung ist das Schienenkopfhärten nach dem Fertigwalzen [4]. Durch partielles Abschrecken alleinig des Kopfes wird dessen Oberflächenhärte gesteigert.

Die Fertigabmessung eines Profils und die jeweilige Produktionsleistung der Walzstraße bestimmen den Durchsatz auf einem Kühlbett bei der Abkühlung

von Walzend- auf Richttemperatur. Im oberen Temperaturbereich (650 - 950°C) kann durch gleichmäßige Kühlung der thermische Verzug der Profile (thermischer Richteffekt) [5] eingeschränkt werden. Im unteren Temperaturbereich (80 - 500°C) kann eine gleichmäßige Intensivkühlung zur Einsparung im Kühlbettbereich führen.

## 2.2 Notwendigkeit der Prozeßbeschreibung

Für die Trägerkühlung auf einer schweren Profilstraße der Arbed-Gruppe wurden spezielle Lösungen entwickelt [1, 3], die nicht direkt auf andere Straßenkonfigurationen übertragbar sind oder für die aus Wettbewerbsgründen keine Lizenzvergabe an Anlagenbetreiber oder -bauer stattfand. Daneben existieren zahlreiche Patentanmeldungen, von denen nur eine geringe Zahl auf Grund des komplexen Charakters des Problems zur Anwendung kommt. Die Komplexität wird wesentlich durch die Vielzahl von Profilen mitbestimmt, die auf Formwalzstraßen gewalzt werden können. Den überwiegenden Produktionsanteil besitzen Träger, Schienen, U-Profile sowie gleichschenklige, ungleichschenklige und unregelmäßige Winkel. Neben der eigentlichen Form variieren die Endabmessungen und die Endwalzgeschwindigkeiten, wie Bild 2 für einige Profile zeigt.

Außerdem können Profile auf verschiedenen Walzstraßenanordnungen, so auf Reversierstraßen, halbkontinuierlichen und kontinuierlichen Straßen gewalzt werden. Bild 3 zeigt als Beispiel schematisch eine Trägerreversierstraße, bestehend aus 2 Universalgerüsten zur gleichzeitigen Reduktion von Steg und Flansch, einem dazwischenliegenden Stauchgerüst zum Höhenstauchen der Flansche sowie vor und hinter der Gerüstgruppe angeordneten Führungslinien mit integriertem Kühlsystem beiderseits der Walzlinie.

Während beim reversierenden Walzen die einzelnen Profilquerschnittsbereiche unterschiedlich stark reduziert werden, soll die selektive Kühlung auf der Flanschaußenseite den in der Mehrzahl der Fälle heißeren Übergangsbereich Steg/Flansch abkühlen, um die Temperatur über den Querschnitt zu gleichmäßigem. Durch die Dickenreduktion von Steg und Flansch wird der zu kühlende Übergangsbereich kleiner. Eine solche Anlage (Bild 4) muß für das größte und kleinste zu kühlende Profil gleichermaßen flexibel einsetzbar sein. Dies kann durch schwenk- und drehbare Kühlrohrreihen mit Flachstrahldüsen erreicht werden.

Der Reversierprozeß ist durch Beschleunigen der Walzader, Anstich und Auswalzen mit freiem Auslauf, Abbremsen und Beschleunigen der Walzader in entgegengesetzter Richtung gekennzeichnet, wodurch die Geschwindigkeiten je nach Stichplan zusätzlich variieren.

Bild 5 hingegen zeigt das Layout einer geplanten kontinuierlichen Schienenstraße mit integrierter Wasserkühlstrecke nach Gerüst 6, in der der Schienenzwischenquerschnitt auf eine niedrige Endwalztemperatur bei gleichzeitiger Vergleichmäßigung der Temperatur über dem Querschnitt abgekühlt werden soll, was schematisch in Bild 6 (linkes Teilbild) dargestellt ist. Durch den unterschiedlichen

Wärmeinhalt von Kopf, Fuß und Steg müssen sowohl Zwischen- als auch Fertigquerschnitte differenziert über dem Umfang gekühlt werden. Ohne ein Offline-Berechnungsmodell ist eine Auslegung einer solchen Anlage und ohne ein Online-Modell der Betrieb der Anlage nicht zu empfehlen.

Um Möglichkeiten der selektiven Kühlung der Profilquerschnitte während und nach dem Walzen zu schaffen, ist die mathematische Beschreibung dieses Teilprozesses und die Möglichkeit einer effektiven numerischen Lösung die erste Voraussetzung für die Konstruktion und die Einplanung derartiger Anlagen sowie der Prozeßkontrolle. Besondere Beachtung verdienen möglichst universell gehaltene, mit hoher Genauigkeit und schnell arbeitende Simulationsmöglichkeiten, da durch die rasche Entwicklung der Technologiekonzepte Einzellösungen schnell der Vergangenheit angehören.

## 2.3 Vereinfachte Kühlmodelle

### 2.3.1 Beschreibung des Kühlprozesses

Betrachtet wird ein Querschnitt des Walz-/Kühlgutes in einem mitbewegten, 2-dimensionalen Koordinatensystem während des Durchlaufs durch die Kühlstrecke. Dem Abkühlungsprozess liegt die parabolische Differentialgleichung der Wärmeleitung zur Bestimmung der Temperatur  $\vartheta$  zugrunde:

$$c(\vartheta)\rho(\vartheta)\frac{\partial\vartheta}{\partial t}(t,x) = \operatorname{div}(\lambda(\vartheta)\operatorname{grad}\vartheta)(t,x). \quad (1)$$

Mit Prozeßbeginn ( $t=0$ ) wird die Anfangstemperaturverteilung vorgegeben:

$$\vartheta(0,x) = \vartheta_0(x) \quad (2)$$

Die Kühlstrecke besteht aus hintereinander geschalteten Kühlsegmenten und dazwischen liegenden Luftabschnitten (s. Abb.1). Aus den Abmessungen der Kühlstrecke und der Durchlaufgeschwindigkeit werden die Zeiten  $t_0 = 0, t_1, \dots, t_k = T$  bestimmt, zu denen der betrachtete Querschnitt in die einzelnen Sektoren eintritt bzw. diese verläßt. Den Wärmeübergang zwischen Walzgut und Kühlwasser modellieren wir mit folgenden Randbedingungen:

$$\lambda\frac{\partial\vartheta}{\partial n}(t,x) = \alpha(t,x)(\vartheta_{fl} - \vartheta) \quad (3)$$

mit den Größen:

- $c(\vartheta)$  – spezifische Wärmekapazität
- $\rho(\vartheta)$  – Dichte
- $\lambda(\vartheta)$  – Wärmeleitfähigkeit
- $\vartheta_{fl}$  – Temperatur des Kühlwassers

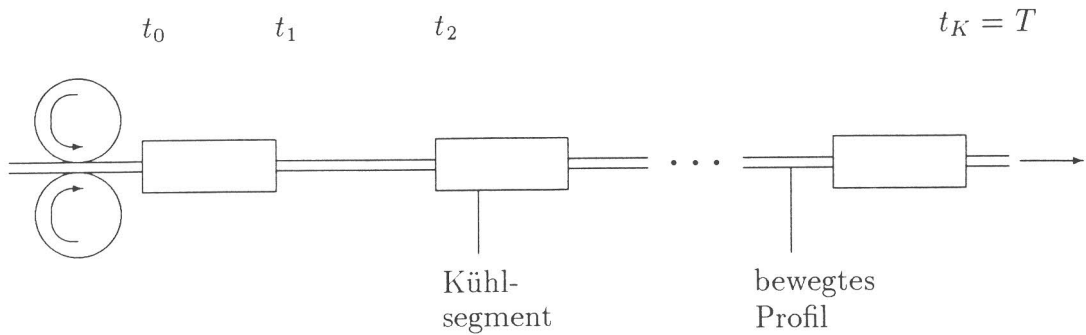


Abbildung 1: Schema einer Kühlstrecke

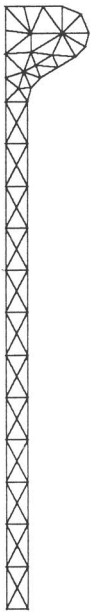
und  $\alpha$  als Wärmeübergangszahl, die abhängig ist von der Oberflächentemperatur des Kühlgutes, dem Abstand der Kühlmittelstrahldüsen von der Kühlgutoberfläche und dem Kühlmittelvolumenstrom.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden zunächst funktionelle Abhängigkeiten der wärmetechnischen Stoffkennwerte von der Temperatur und der Stahlzusammensetzung nach [6] benutzt. Nach Berechnungen, bei denen auch die Temperaturbereiche der Gefügeumwandlung durchschritten wurden, kamen die in Anlage 1 enthaltenen Stoffkennwerte zur Anwendung (vgl. auch Abschnitt 5.1).

Zunächst wurden vereinfachte Modelle aufgebaut, um durch eine "Vorwärtsrechnung" bei Vorgabe der Kühlstrecke, der Anfangstemperaturverteilung, dem Geschwindigkeits-/ Zeitregime und über den Umfang der Profile unterschiedliche, jedoch über die Länge eines Kühlsegments konstant bleibende Wärmeübergangszahlen eine sinnvolle Dimensionierung der Kühlstrecke hinsichtlich Länge, Ort und Anzahl der Düsen sowie Wasserverbrauch mit ausreichender Schnelligkeit vornehmen zu können.

Für Träger, Winkel- und U-Profile wurde ein Modell basierend auf der Finite Differenzen-Methode und für Schienen und Wulstprofile auf der Finite-Elemente-Methode erarbeitet [7], wobei für letzteres speziell das an der TU Chemnitz entwickelte Programmpaket FEMGP [8] mit dem Netzgenerator PREMESH verwendet wurde. Zwei der verwendeten Grobnetze sind unten dargestellt.



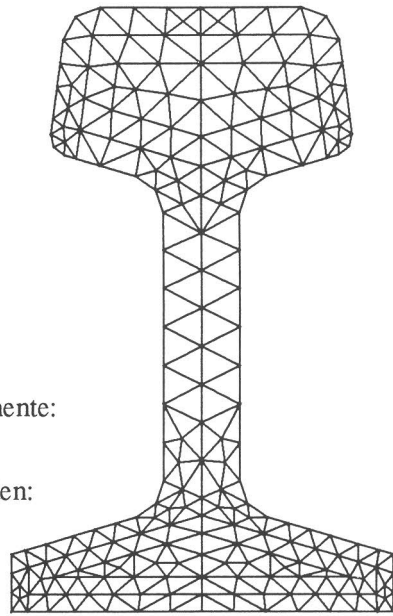


Anzahl der Elemente:

76

Anzahl der Knoten:

59



Anzahl der Elemente:

221

Anzahl der Knoten:

358

### 2.3.2 Anwendungsbeispiele und Schlußfolgerungen

Einige Anwendungsbeispiele der unter 2.3.1 genannten Modelle sind in [7] enthalten. Die Berechnungen zeigten:

1. Beim Trägerwalzen ist eine selektive Kühlung des Übergangsbereichs Steg/Flansch nur bis zu mittleren Trägergrößen sinnvoll. Gekühlt werden muß vor und nach jedem Stich mit Ausnahme der ersten 3 Stiche bezogen auf ein endabmessungsnah gegossenes Vorprofil. Die Führungsliniale vor und hinter einem Reversieruniversalgerüst müßten um  $1/3$  ihrer Länge vergrößert werden, wenn in ihnen die Kühleinrichtung integriert wird, da die technisch realisierbaren Wärmeübergangswerte nicht ausreichen. Die genaue Eingrenzung der Parameter und des Anwendungsbereiches war auf Grund des Aufwandes für die Simulationsberechnungen bislang nicht möglich.
2. Dem QST-Prozeß sind trotz des Einsatzes von Spezialdüsen Grenzen gesetzt. Die Endwalzgeschwindigkeit ist beschränkt, da sonst die Länge der Kühlstrecken und der Wasserverbrauch unverträglich wachsen. Eine genaue Eingrenzung des Prozesses war auch in diesem Fall auf Grund des Aufwandes für die nötigen Simulationsberechnungen bislang nicht möglich.
3. Eine effektive selektive Kühlung eines ca.  $1050^{\circ}\text{C}$  warmen Schienenzwischenquerschnitts auf ca.  $850^{\circ}\text{C}$  min. Endwalztemperatur ist mit der in Bild 5 gezeigten Anordnung (12 m Kühlstrecke,  $v = 1,3$  m/s) technisch nicht möglich. Die Kühlstrecke müßte bedeutend länger sein. Um jedoch herauszufinden, mit welcher Kühlstreckenlänge, Düsenanzahl, Düsentyp sowie Verteilung über den Umfang und Aufteilung der Kühlsektionen über die

Länge der Kühlstrecke das Ziel erreicht werden kann bzw. Einschränkungen festzustellen, bedurfte es der Erstellung eines optimierten Identifikationsmodells.

Während sich einfache aus Rechtecken zusammengesetzte Geometrien wie z.B. Träger, Winkel und U-Profile noch durch vereinfachte Modelle mit vertretbarem Aufwand berechnen lassen, sind für kompliziertere krummlinig berandete Geometrien wie z.B. Schienen und Flachwulst aufwendigere Modelle erforderlich. Dasselbe gilt für alle Profile, wenn man den Wärmeübergangswert orts- und temperaturabhängig zuläßt.

### **3 Wärmeübergang bei der Spritzwasserkühlung**

Der Wärmeübergang bei der Spritzwasserkühlung wurde in zahlreichen Untersuchungen ermittelt, indem Stahlplatten (ausgestattet mit Thermoelementen in verschiedenen Schichten) erhitzt und anschließend mit Spritzwasser abgekühlt wurden, wobei die Einflußparameter variiert wurden [9 - 13]. Die gefundenen Abhängigkeiten zeigt beispielhaft Bild 7. Die starke Streuung ist auf unterschiedliche Versuchsbedingungen, den Düsentyp, das Kühlmedium, den Kühlmittelvolumenstrom und den Abstand der Düsen von der Plattenoberfläche zurückzuführen.

Für die Berechnungen kann nach Stabilisierung des Modells auf verschiedene Abhängigkeiten unter Beachtung des Einsatzfeldes und der technischen Realisierbarkeit zurückgegriffen werden. Im konkreten Einsatzfall sind eigene Versuche notwendig, da die Streubreite zu groß ist.

### **4 Aufbau des mathematischen Modells "Optimale Steuerung von Kühlsegmenten"**

Das Ziel der selektiven Kühlung besteht darin, den Kühlprozess so zu steuern, daß zum Endzeitpunkt die Temperatur möglichst niedrig ist, wobei während des gesamten Prozesses gewisse Bedingungen an den Temperaturgradienten bzw. an die Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Querschnittsbereichen erfüllt sein müssen.

Zur Diskretisierung des Problems werden im Inneren des Profils gewisse Punkte  $P_i$  eingeführt, in denen die Temperatur zu minimieren ist. Es ist sinnvoll, diese Punkte dort zu plazieren, wo die höchsten Temperaturen erwartet werden. Außerdem werden auf dem Rand des Profils Punkte  $Q_j$  ausgewählt, um den Temperaturgradienten durch die Differenzenquotienten der Temperatur zwischen den Punkten  $P_i$  und  $Q_j$  zu approximieren.

Wir betrachten nun folgendes Optimierungsproblem:

$$\min F_1 = \sum_{i=1}^{N_p} \alpha_i \vartheta(T, P_i), \quad (4)$$

d.h. zu minimieren ist eine Linearkombination der Temperaturen in den Punkten  $P_i$  (mit gewissen Gewichten  $\alpha_i$ ) zum Endzeitpunkt  $T$  bei folgenden Nebenbedingungen:

- nichtlineare Wärmeleitgleichung

$$c(\vartheta)\rho(\vartheta)\frac{\partial\vartheta}{\partial t}(t, x) = \operatorname{div}(\lambda(\vartheta) \operatorname{grad} \vartheta)(t, x) \quad (5)$$

- Anfangsbedingung

$$\vartheta(0, x) = \vartheta_0(x) \quad (6)$$

- Randbedingung dritter Art

$$\frac{\partial\vartheta}{\partial n} = u(t, x) \alpha(\vartheta)(\vartheta_{fl} - \vartheta). \quad (7)$$

Der Parameter  $u(t, x)$  in der Randbedingung ist ein Maß für die Aktivität der Kühldüsen und dient als Steuerung. Er kann nur Werte zwischen 0 (Düsen abgeschaltet) und 1 (Düsen arbeiten mit voller Leistung) annehmen. Damit erhalten wir die zusätzliche Bedingung

$$0 \leq u(t, x) \leq 1. \quad (8)$$

Die Beschränkungen an den Temperaturgradienten modellieren wir in der Form

$$\left| \frac{\vartheta(t, P_i) - \vartheta(t, Q_j)}{\operatorname{dist}(P_i, Q_j)} \right| \leq \Theta_{ij}(t). \quad (9)$$

Zur numerischen Lösung dieser Aufgabe muß die Menge der zulässigen Steuerungen auf einen endlichdimensionalen Raum eingeschränkt werden. Dazu wird der Rand des Gebietes in  $K$  verschiedene Kühlzonen unterteilt, die jeweils einer Düse (oder mehreren Düsen mit gleicher Steuerung) zugeordnet werden. Außerdem wird jeder Kühlsektor in Abschnitte unterteilt, was technisch mehreren hintereinander angeordneten, getrennt steuerbaren Düsen entspricht. Die Gesamtzahl der Steuerabschnitte in der Kühlstrecke sei mit  $L$  bezeichnet. Wir nehmen die Steuerung  $u$  jetzt als zeitlich und örtlich stückweise konstante Funktion an. Durch Einführung der Basisfunktionen

$$u_{lk}(t, x) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } t \in [t_{l-1}, t_l), x \in \Gamma_k \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (10)$$

kann die Steuerung  $u$  als

$$u(t, x) = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K u^{lk} u_{lk}(t, x) \quad (11)$$

mit den zu bestimmenden Koeffizienten  $u^{lk}$  dargestellt werden. Die Steuerbeschränkungen lauten dann

$$0 \leq u^{lk} \leq 1. \quad (12)$$

Als Lösungsmethode für dieses Optimierungsproblem setzen wir die Methode der zulässigen Richtungen ein. Im allgemeinen Fall sieht diese Methode wie folgt aus:

Zur Lösung des Optimierungsproblems

$$\min \quad f(\vartheta, u) \quad (\text{Zielfunktional}) \quad (13)$$

bei den Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} T(\vartheta, u) &= 0, & (\text{partielle DGL}) \\ g_i(\vartheta) &\leq 0, & i = 1, \dots, k, \\ u &\in U^{ad} \end{aligned}$$

betrachten wir für ein gegebenes  $\vartheta$  die Menge der  $\varepsilon$ -aktiven Nebenbedingungen  $I_{act}$

$$i \in I_{act}, \quad \text{wenn} \quad -\varepsilon < g_i(\vartheta) \leq 0 \quad (14)$$

und die Menge der  $\varepsilon$ -inaktiven Nebenbedingungen  $I_0$

$$i \in I_0, \quad \text{wenn} \quad g_i(\vartheta) \leq -\varepsilon. \quad (15)$$

Der Iterationsprozess sieht dann folgendermaßen aus:

S0 Wähle eine Startiteration  $u_0$ , den Startwert  $\varepsilon_0$  und die Abbruchgenauigkeit  $\varepsilon_{abb}$ .

S1 Finde den zugehörigen Zustand  $\vartheta_0$  aus  $T(\vartheta_0, u_0) = 0$ .

S2 Löse das linearisierte Problem:

$$\begin{aligned} f_{\vartheta}(\vartheta_n, u_n)\Theta + f_u(\vartheta_n, u_n)U &= \min! \\ T_{\vartheta}(\vartheta_n, u_n)\Theta + T_u(\vartheta_n, u_n)U &= 0 \\ g'_i(\vartheta_n)\Theta &\leq 0, \quad i \in I_{act} \\ u_n + U &\in U^{ad} \end{aligned}$$

mit  $\Theta = \vartheta - \vartheta_n, U = u - u_n$ .

## 5 Beispielrechnungen

Mit oben beschriebenem Modell führten wir zahlreiche Testrechnungen zur Abkühlung von Schienenprofilen (Bsp. 1-6, 1a, 2a) und Wulstprofilen (Beispiel 7) durch.

Wir betrachteten für die Schienenprofile eine Kühlstrecke aus einem einzelnen Kühlsegment mit 10 Abschnitten und einer Durchlaufzeit von 50 s, während für das Wulstprofil eine Kühlstrecke aus 3 Kühlsegmenten und 2 Luftabschnitten mit einer Durchlaufzeit von jeweils 20 s angenommen wurde. Die Kühlsegmente wurden hier in je 4 Abschnitte unterteilt.

Bei den Testrechnungen, speziell beim Schienenprofil, wurden die verschiedenen Modellparameter variiert, um den Einfluß dieser Parameter auf die Steuerung zu untersuchen. Solche Parameter sind unter anderem die Stoffwerte (also die Koeffizientenfunktionen in der Wärmeleitgleichung), das Anfangstemperaturprofil und die Gitteranzahl im Multigrid-Verfahren.

Einige dieser Beispielrechnungen sind im Anhang dargestellt. Konkret handelt es sich dabei um Beispiele mit folgender Parameterwahl:

- Bsp. 1 Schienenprofil,  
 $T_{\text{Start}} = 1000 - 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 300 \text{ K}$ ,  $t_{ges} = 50 \text{ s}$ ,  $q_{max} = 10^6 \text{ W/m}^2$ ,  
Stoffwerte nach Anlage 1
- Anfangstemperaturverteilung: s. Bild 10  
Wärmeübergangszahlen: s. Bild 11  
Temperaturfeld am Ende der Kühlstrecke: s. Bild 12
- Bsp. 2 Schienenprofil,  
 $T_{\text{Start}} = 850 - 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 300 \text{ K}$ ,  $t_{ges} = 50 \text{ s}$ ,  $q_{max} = 10^6 \text{ W/m}^2$ ,  
Stoffwerte nach Anlage 1
- Anfangstemperaturverteilung: s. Bild 13  
Wärmeübergangszahlen: s. Bild 14  
Temperaturfeld am Ende der Kühlstrecke: s. Bild 15
- Bsp. 1a Wie Bsp. 1, jedoch Anfangstemperaturverteilung mit 3 Sektoren
- Anfangstemperaturverteilung: s. Bild 21  
Wärmeübergangszahlen: s. Bild 22  
Temperaturfeld am Ende der Kühlstrecke: s. Bild 23
- Bsp. 2a Wie Bsp. 2, jedoch Anfangstemperaturverteilung mit 3 Sektoren
- Anfangstemperaturverteilung: s. Bild 24  
Wärmeübergangszahlen: s. Bild 25  
Temperaturfeld am Ende der Kühlstrecke: s. Bild 26

Bsp. 3 Wie Bsp. 1, jedoch Stoffwerte nach [6]

Anfangstemperaturverteilung: s. Bild 10  
Wärmeübergangszahlen: s. Bild 16  
Temperaturfeld am Ende der Kühlstrecke: s. Bild 17

Bsp. 4 Wie Bsp. 2, jedoch Stoffwerte nach [6]

Anfangstemperaturverteilung: s. Bild 13  
Wärmeübergangszahlen: s. Bild 18  
Temperaturfeld am Ende der Kühlstrecke: s. Bild 19

Bsp. 5 Wie Bsp. 1a, jedoch zulässiger Temperaturgradient linear von 8000 grd/m zum Zeitpunkt 0 auf 3000 grd/m zum Endzeitpunkt gesenkt

Anfangstemperaturverteilung: s. Bild 21  
Wärmeübergangszahlen: s. Bild 27  
Temperaturfeld am Ende der Kühlstrecke: s. Bild 28

Bsp. 6 Wie Bsp. 2a, jedoch zulässiger Temperaturgradient linear von 8000 grd/m zum Zeitpunkt 0 auf 3000 grd/m zum Endzeitpunkt gesenkt

Anfangstemperaturverteilung: s. Bild 24  
Wärmeübergangszahlen: s. Bild 29  
Temperaturfeld am Ende der Kühlstrecke: s. Bild 30

Bsp. 7 Wulstprofil,

$T_{\text{Start}} = 800 - 850 \text{ °C}$ ,  $|\nabla T| = 7000 \text{ K/m}$ ,  $t_{\text{ges}} = 100 \text{ s}$ ,  $q_{\text{max}} = 10^6 \text{ W/m}^2$ , Stoffwerte nach Anlage 1

Anfangstemperaturverteilung: s. Bild 32  
Temperaturfeld in der Mitte der Kühlstrecke: s. Bild 33  
Temperaturfeld am Ende der Kühlstrecke: s. Bild 34  
Wärmeübergangszahlen: s. Bild 35

## 5.1 Einfluß wärmetechnischer Stoffkennwerte

In den Testrechnungen wurden verschiedenen Stoffwerte benutzt. Das waren zum einen Werte nach [6], in denen die Umwandlungswärme durch eine im Bereich zwischen 700 und 800 °C erhöhte Wärmekapazität modelliert wird, und zum anderen real gemessene Werte nach Anlage 1. Die Stoffwerte nach Anlage 1 führten im Temperaturbereich  $\vartheta < 850 \text{ °C}$  zu etwas geringerer Abkühlung im Vergleich zu Werten nach [6], da die wahre spezifische Wärmekapazität die entstehende Umwandlungswärme berücksichtigt (man vergleiche Ergebnisse nach Beispiel 2 und 4). Deshalb werden in den Beispielen 1a, 2a sowie 5 und 6 nur noch die Stoffwerte nach Anlage 1 benutzt.

## 5.2 Einfluß des Freiheitsgrades der Anfangstemperaturverteilung

Die Anfangstemperatur wurde in allen Testrechnungen als stückweise konstant angenommen. Dabei wurden Kopf und Fuß des Schienenprofils in Temperatursektoren eingeteilt. In den Beispielen 1 und 2 waren jeweils 2 Sektoren vorgegeben, während in den Beispielen 1a und 2a je 3 Sektoren in Kopf und Fuß festgelegt wurden, um die realen Verhältnisse besser zu modellieren. Es zeigte sich, daß die feinere Unterteilung zu keinen nennenswerten Unterschieden in den Ergebnissen führte. Es genügt also, Kopf und Fuß in 2 Temperatursektoren zu unterteilen, was den Aufwand bei der Gittergenerierung senkt und gröbere Ausgangsgitter zuläßt. Damit sinkt auch der Rechenaufwand im Multigrid-Verfahren.

## 5.3 Einfluß unterschiedlicher Gitter

Es wurden Testrechnungen auf verschieden feinen Gittern durchgeführt. Dabei wurde stets das gleiche Grobgitter, aber unterschiedlich viele Verfeinerungsstufen benutzt. Es zeigte sich, daß die Ergebnisse auf zu groben Gittern (1 bzw. 2 Gitter) nicht ausreichen. Ist eine hinreichende Genauigkeit erreicht, bringt eine weitere Verfeinerung keine wesentlichen Änderungen mehr, nur der Rechenaufwand vervierfacht sich mit jeder weiteren Verfeinerungsstufe. In unseren Beispielen erwiesen sich 3 Gitter als ausreichend, um gute Ergebnisse zu erzielen.

## 5.4 Beschränkungen des Temperaturgradienten

Zur Sicherung der gleichmäßigen Abkühlung der Profile wurden verschiedene Nebenbedingungen ins Modell eingebaut: einmal Beschränkungen an die Temperaturdifferenzen zwischen verschiedenen Punkten, zum anderen Beschränkungen an den Temperaturgradienten. In beiden Fällen erzielten wir recht gute Ergebnisse mit den erwarteten Eigenheiten. Im ersten Fall war an den Stellen geringer Profildicke ein großes Temperaturgefälle zu beobachten war. Im zweiten Fall zeigten sich Schwächen bei sehr langgestreckten Profilen (z.B. Wulstprofil). Die absoluten Temperaturdifferenzen zwischen den Querschnittsbereichen wurden sehr hoch, obwohl die Gradientenbeschränkung nicht verletzt wurde. Welche Nebenbedingungen gewählt werden, sollte also vom jeweiligen Profil abhängig gemacht werden. Zur Sicherheit kann auch eine Kombination beider Beschränkungstypen verwendet werden.

Profil	Kühlart	Zwischen- gerüstkühlung T-Ausgleich TM-Walzung	Vorkühlung bei Kühlbett- auflauf	Kühlung auf Richttempe- ratur
Träger generell von ... bis ...		+	-	+
		?		?
		?		?
Winkel generell von ... bis ...		?	?	?
U-Profil generell von ... bis ...		?	?	?
Flachwulstprofil generell von ... bis ...		?	?	?
Schiene generell Zwischenprofil		+	-	?
		?		

Bevor entschieden werden kann, auf welche Profile und Kühlarten die Arbeiten zu konzentrieren sind, sollte im Rahmen einer Studie kurzfristig eine nochmalige Analyse des Standes der Technik erfolgen.

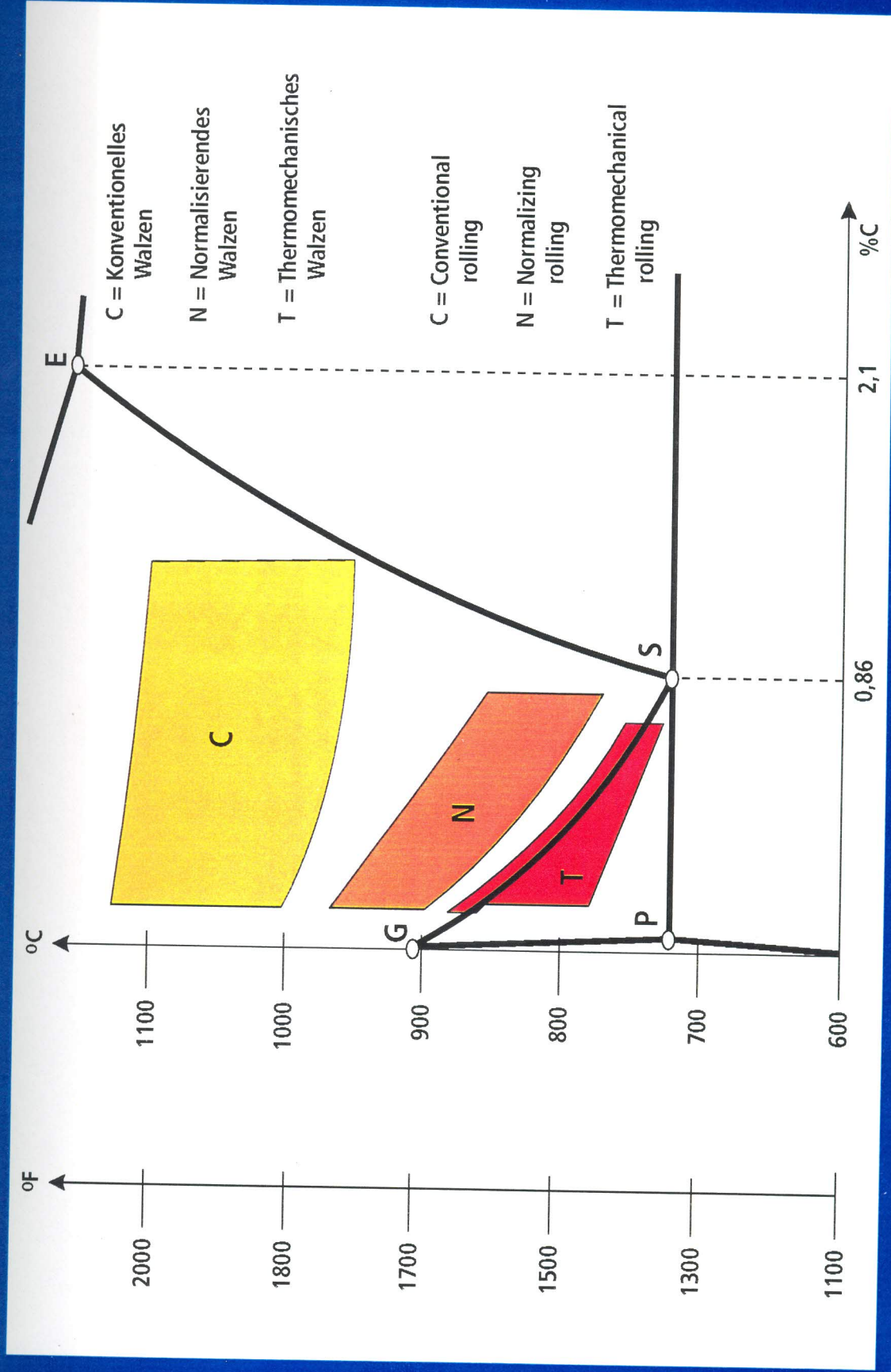
## Literatur

- [1] Becker, F., Dengler, J.-M., Schmedders, H., Wick, K.: *Thermomechanische Behandlung von Walzprofilen*. Stahl und Eisen 111 (1991), Nr. 4, S. 133-138.
- [2] Frantz, A., Becker, F., de la Hamette, J.: *Verbesserte thermomechanische Walzprozesse für schwere Trägerprofile*. Stahl und Eisen 109 (1989), Nr. 9, S. 171-176.
- [3] Panunzi, C., Rasquin, M., Dengler, J.-M., Wilmotte, S.: *Intensivkühlung von Fein - und Mittelstahl*. Stahl und Eisen 110 (1990), Nr. 6, S. 39-43.
- [4] Patent EP 0693562 A1 *Verfahren und Vorrichtung zur Wärmebehandlung von profiliertem Walzgut*. Voest Alpine Schienen-GmbH.

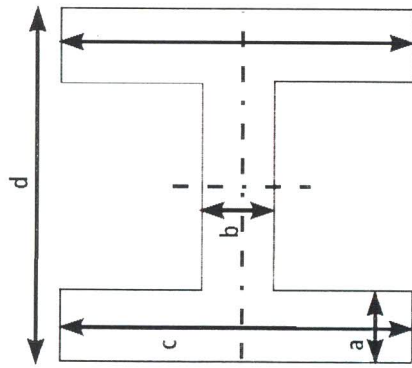


- [5] Ihme, F., Flaxa: *QST-Behandlung von schweren Trägerprofilen*. Stahl und Eisen 112 (1992), Nr. 10, S. 75-81.
- [6] Zurdel, K., Brennecke, N.: *Untersuchungen zum Wärmeübergang bei der Wasserkühlung von Feinstahl und Walzdraht*. Diss. A, TH Magdeburg, 1974.
- [7] Eppler, K., Lezius, R., Wehage, H., Werners, R.: *Temperaturfeldberechnungen für das selektive Kühlen von Profilen in Walzstraßen*. Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft - Anwendungsbezogene Optimierung und Steuerung, Report Nr. 538, 1994.
- [8] Queck, W. (Koordinierender Autor) *FEMGP - Finite-Element-Multi-Grid-Package. Programmdokumentation*. TU Chemnitz-Zwickau, Fachbereich Mathematik, 1993.
- [9] Steward, I., Massingham, J.D., Hagers, J.J.: *Heat transfer coefficient effects on spray cooling*. Iron and Steel Engineer 73 (1996), Nr. 7, pp. 17-23.
- [10] Müller, H., Jeschar, R.: *Untersuchungen des Wärmeübergangs an einer simulierten Sekundärkühlzone beim Stranggießverfahren*. Archiv für das Eisenhüttenwesen 44 (1973), Nr. 8, S. 589-594.
- [11] Raudensky, M., Bending, L., Horsky, J.: *Experimental study of heat transfer in process of rolls cooling in rolling mills by water jets*. Steel Research 65 (1994), Nr. 1, pp. 29-34.
- [12] Prinz, B., Bamberger, M.: *Determination of heat transfer coefficient of air mist sprays*. Mater. Sci. Technol. 5 (1989), Nr. 3, pp. 389-393.
- [13] Olden, V., Smabrekke, A., Raudensky, M.: *Numerical simulation of transient cooling of hot rolled asymmetrical ship profile (Holland profile)*. Ironmaking and Steelmaking 23 (1996), Nr. 1, pp. 88-91.

# Temperaturbereiche des Walzens Temperature Range of Rolling



Bild/ Fig. 1

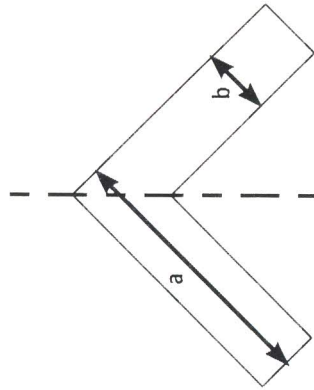


Abmessung · Dimension:

- a = 5,6 – 120 – 45 mm
- b = 3,8 – 200 – 75 mm
- c = 46,0 – 410 – 400 mm
- d = 80,0 – 1300 – 1100 mm

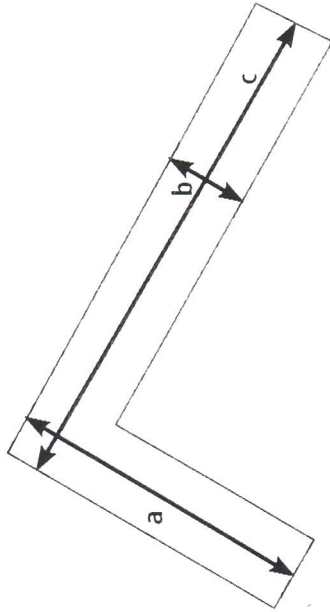
Walzgeschwindigkeit · Rolling speed:

$V_{WV} = 0,5 - 12 \text{ m/s}$



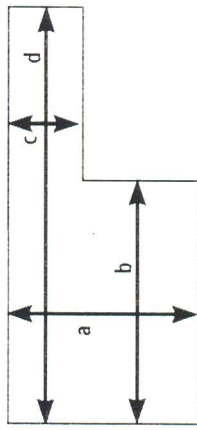
- a = 20,0 – 250 mm
- b = 3,0 – 25 mm

$V_{WV} = 0,5 - 15 \text{ m/s}$



- a = 20,0 – 100 mm
- b = 3,0 – 14 mm
- c = 30,0 – 200 mm

$V_{WV} = 0,5 - 15 \text{ m/s}$

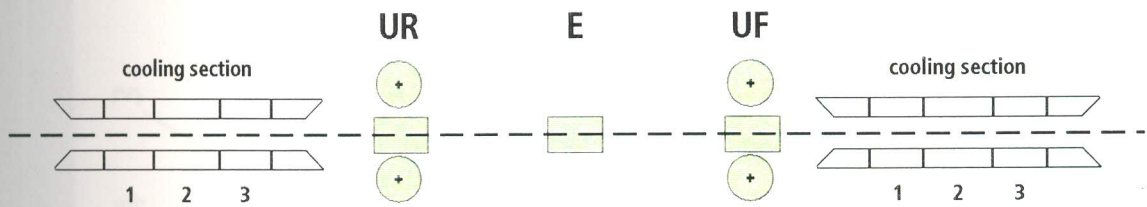


- a = 90,0 – 100 mm
- b = 14,0 – 80 mm
- c = 9,0 – 60 mm
- d = 200,0 – 400 mm

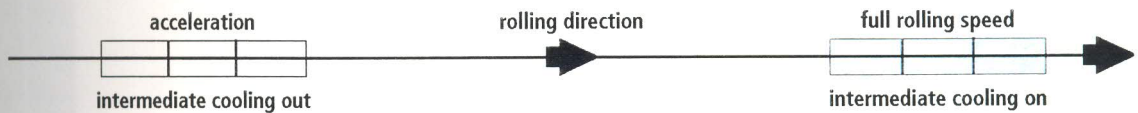
$V_{WV} \leq 2,0 \text{ m/s}$

# Walzen von Trägern mit selektiver Flanschkühlung

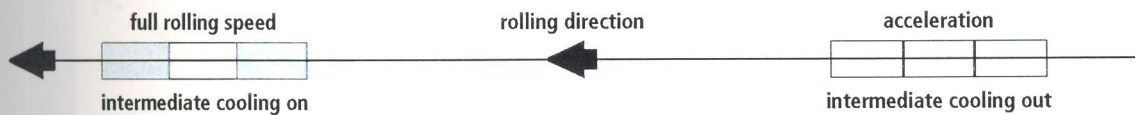
## Rolling of Beams with Selective Flange Cooling



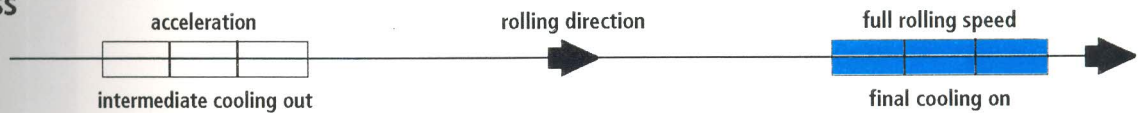
pass n-2



pass n-1

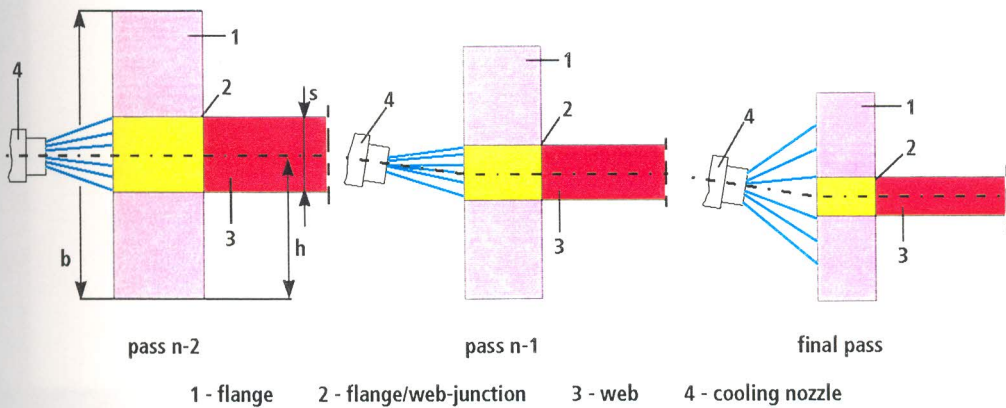


final pass

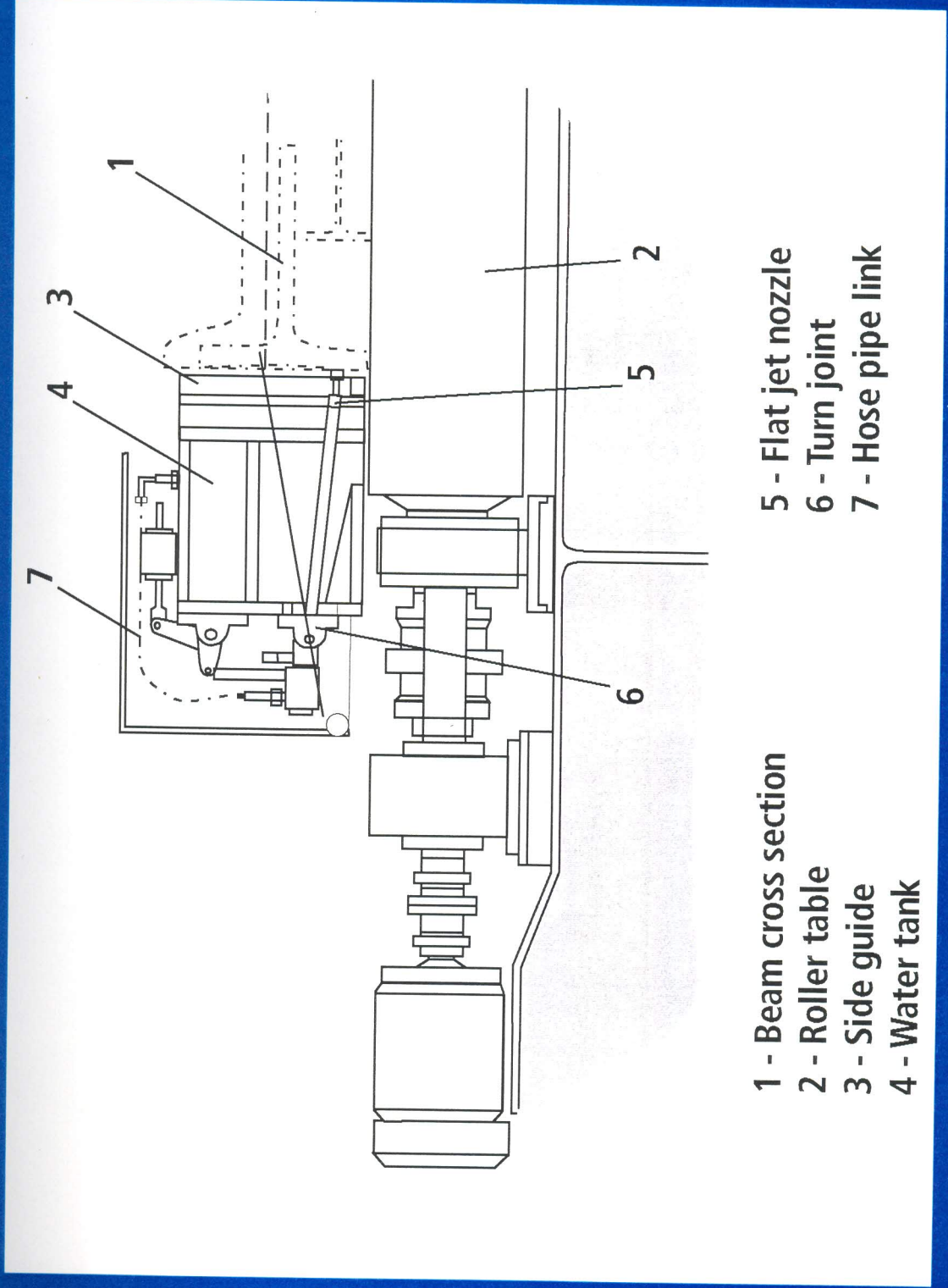


UR - Universal roughing stand  
 E - Flange edger  
 UF - Universal finishing stand

intermediate cooling section out  
 intermediate cooling section on  
 final cooling section on



# Ausrüstung für selektive Flansch­kühlung Equipment for Selective Flange Cooling

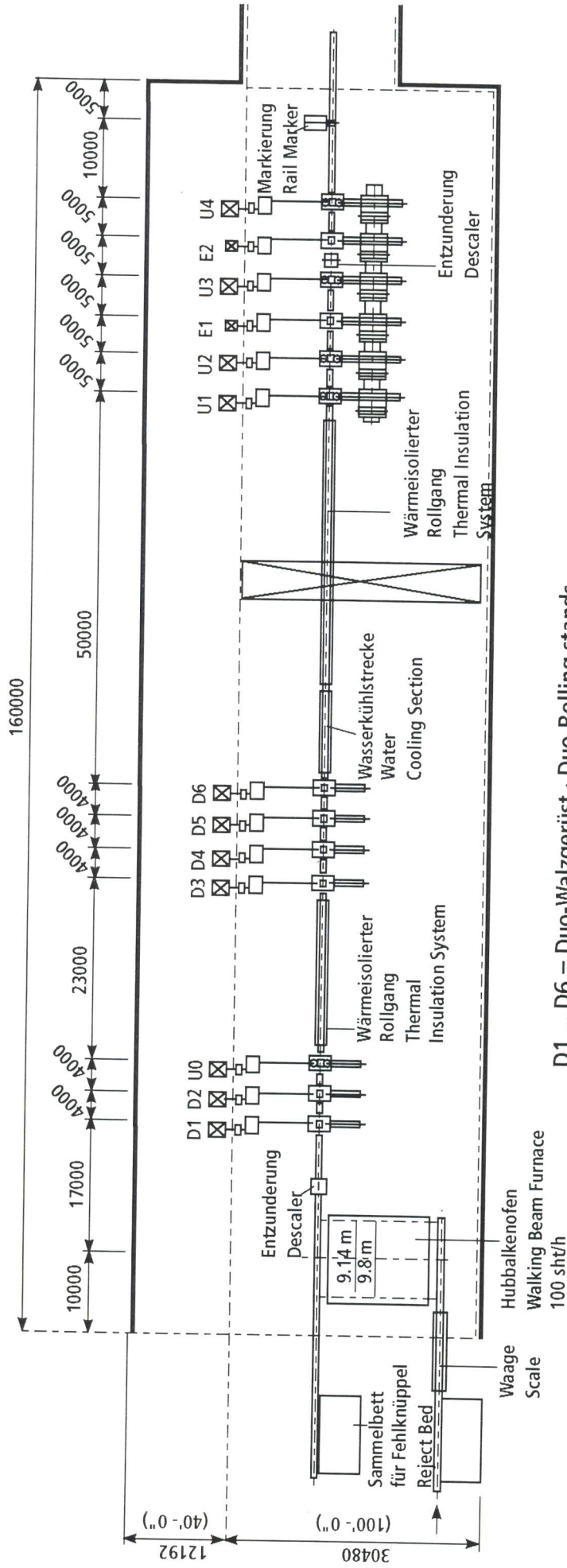


- 1 - Beam cross section
- 2 - Roller table
- 3 - Side guide
- 4 - Water tank

- 5 - Flat jet nozzle
- 6 - Turn joint
- 7 - Hose pipe link

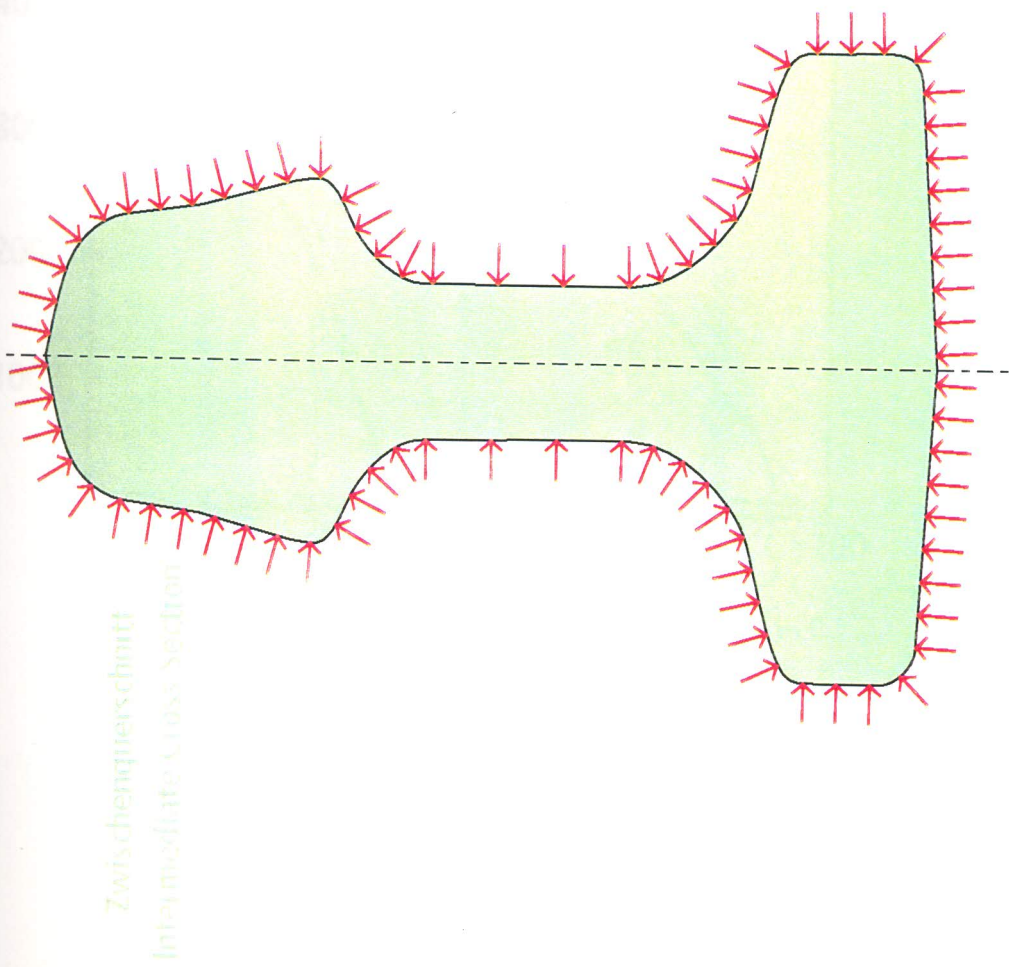
Bild/ Fig. 4

# Schienenstraße mit Zwischenkühlung Rail Rolling Mill with Intermediate Cooling

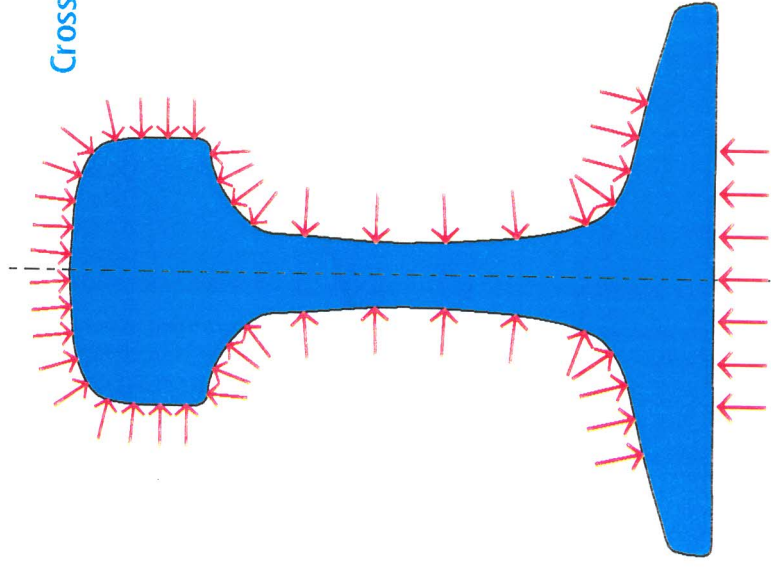


D1 ... D6 = Duo-Walzgerüst · Duo-Rolling stands  
 U0 ... U4 = Universalgerüst · Universal stands  
 E1 ... E4 = Stauchgerüst · Edger stands

Bild/Fig. 5

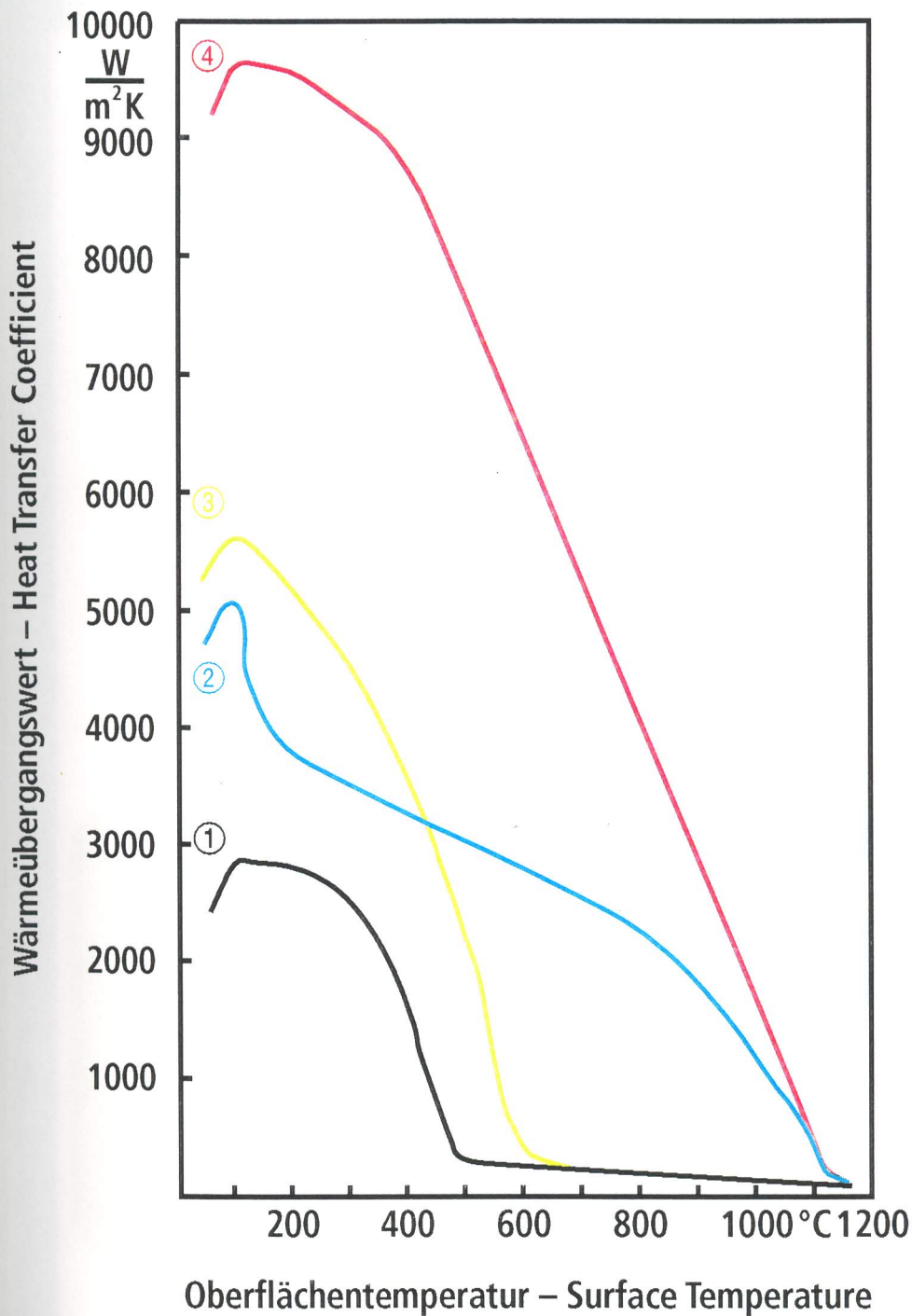


Endquerschnitt  
Cross Section after Final Pass



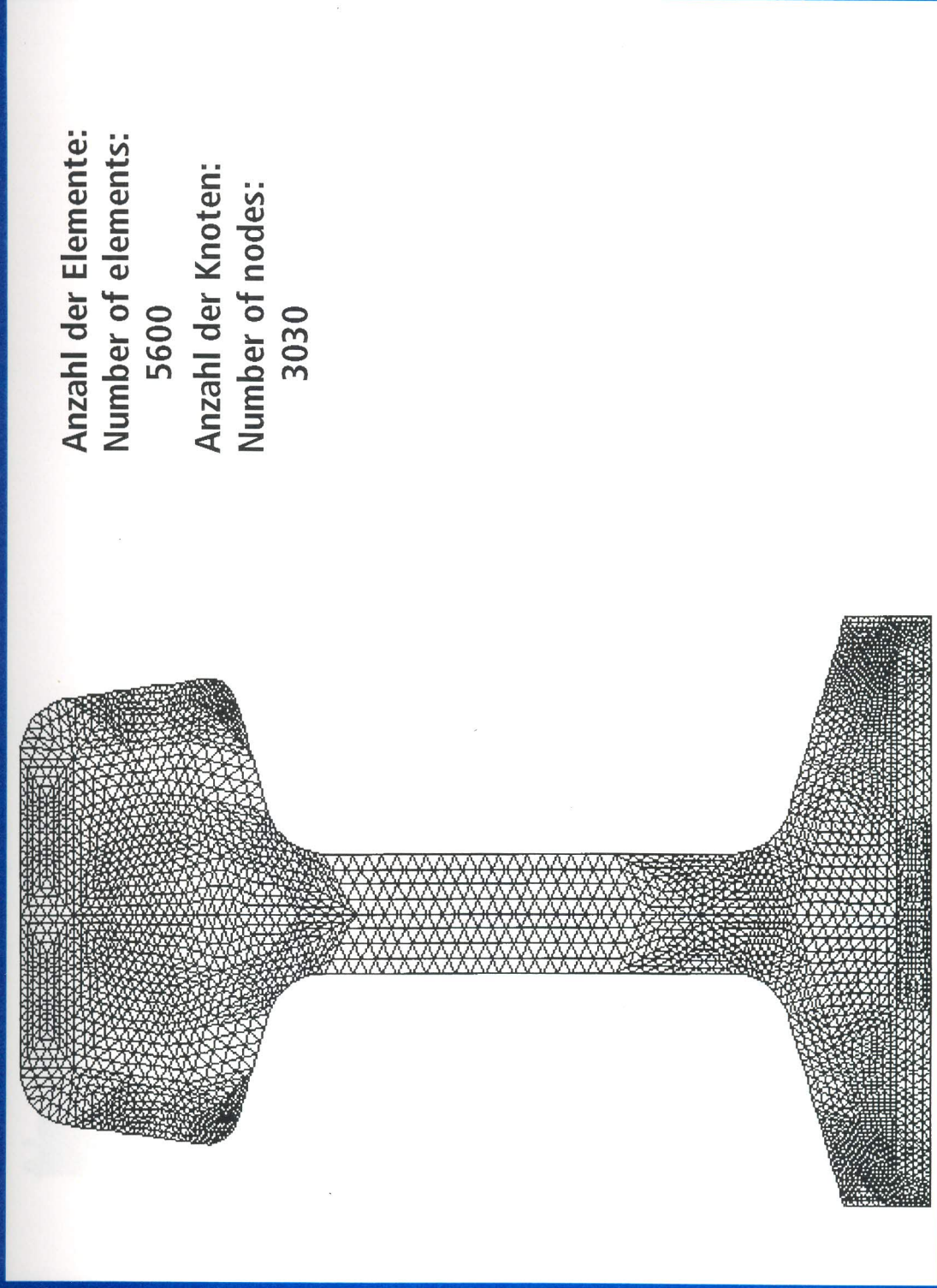
Bild/ Fig. 6

# Wärmeübergangswert Heat Transfer Coefficient



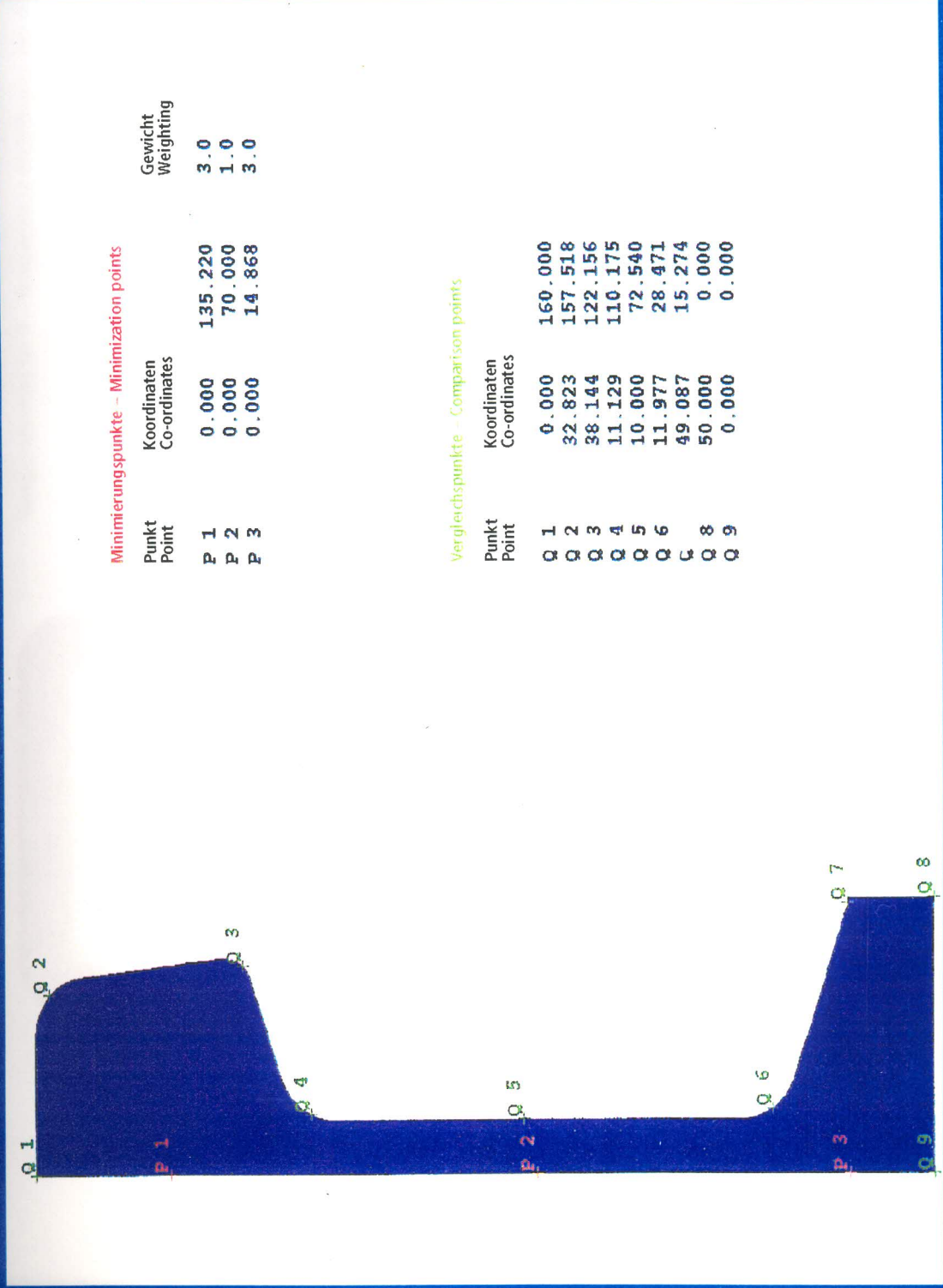
- ① – Moderate impact density nozzle
- ② – High impact density nozzle
- ③ – M.-J. Exp. , TU-Brno results
- ④ – Special nozzle





Bild/Fig. 8

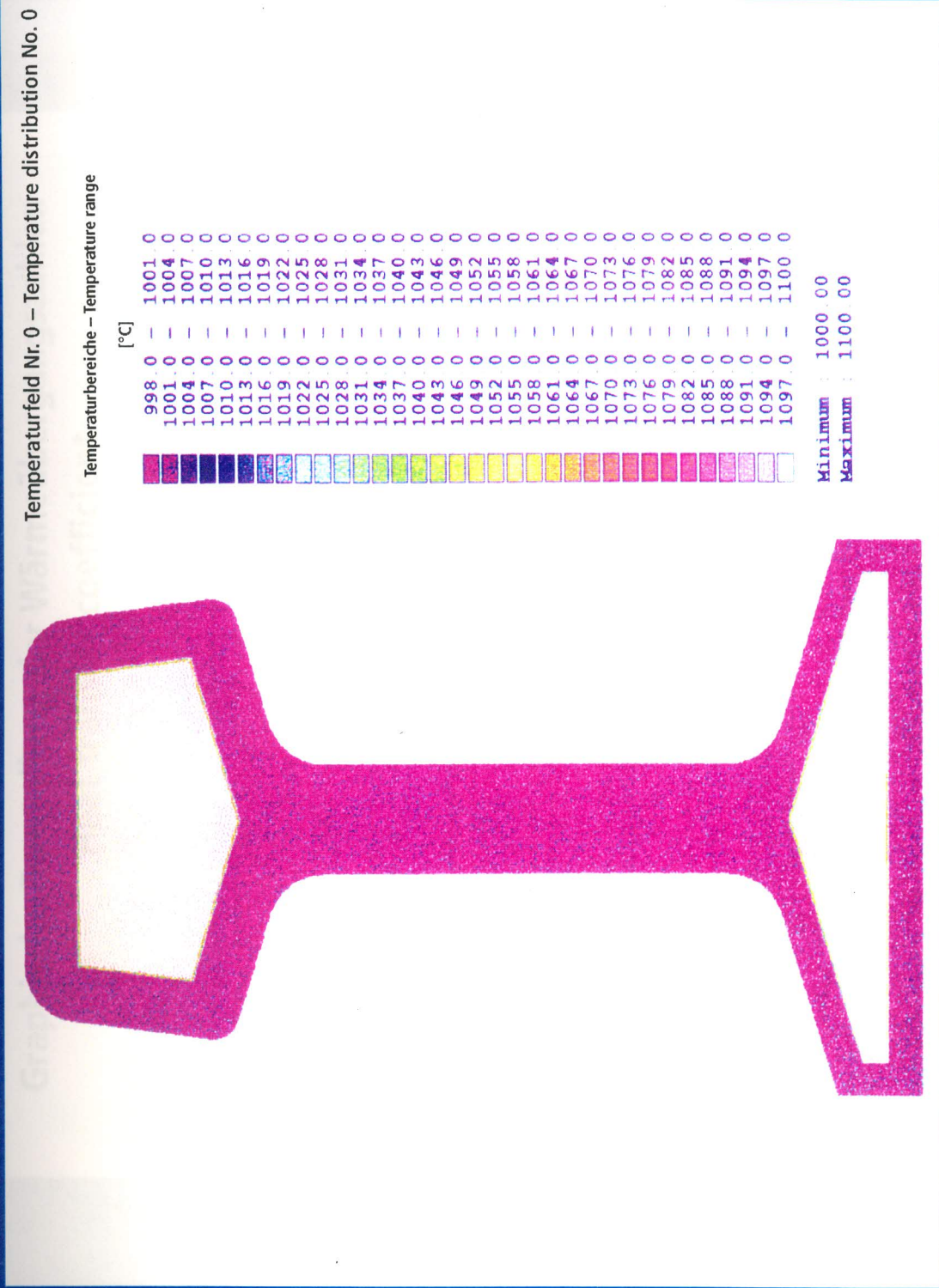
# Lage der Minimierungs- (Pi) und Vergleichspunkte (Qj) Location of Minimization (Pi) and Comparison (Qj) Points



Bild/ Fig. 9



# Beispiel 1 Anfangstemperaturverteilung Example 1 Start Temperature Distribution



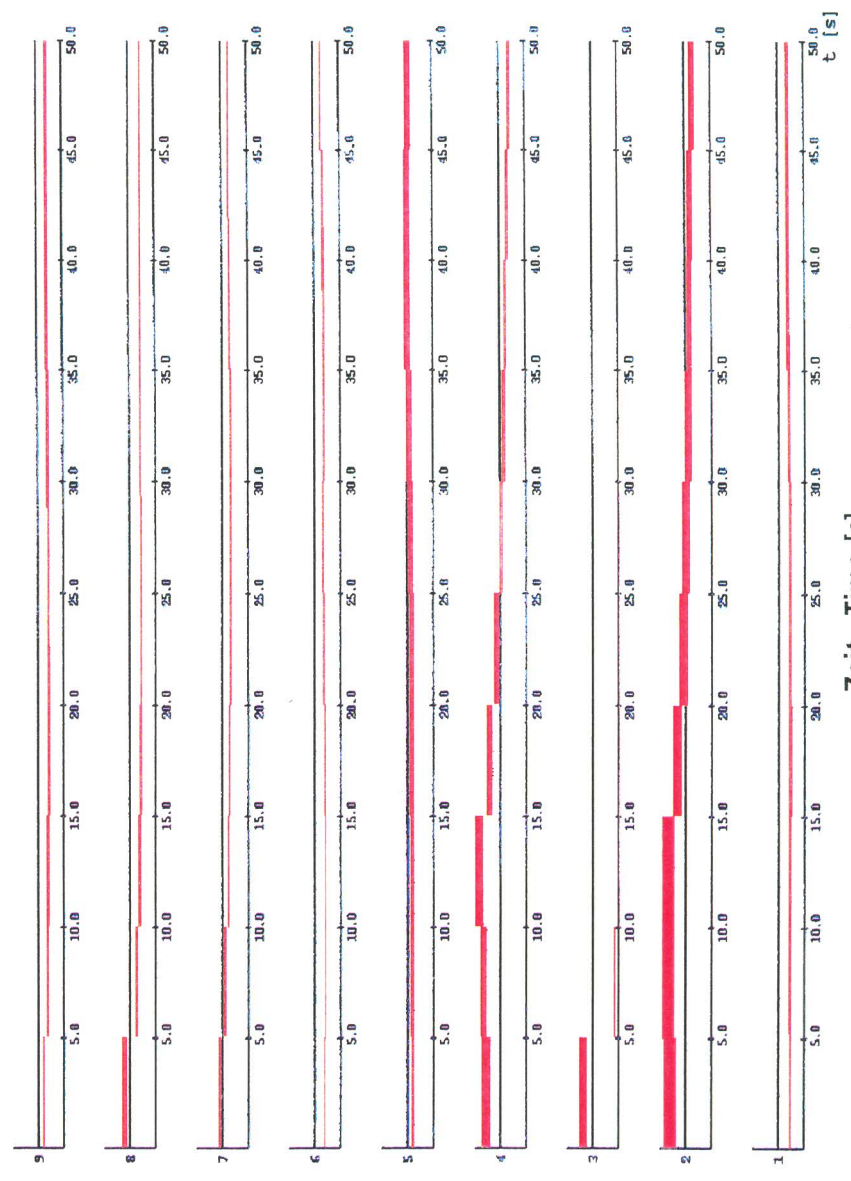
Bild/ Fig. 10

# Graphische Darstellung der Wärmeübergangszahlen

## Heat transfer coefficient

$$\alpha_{\text{max.}} = 1685.8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Kühlzone  
Cooling zone



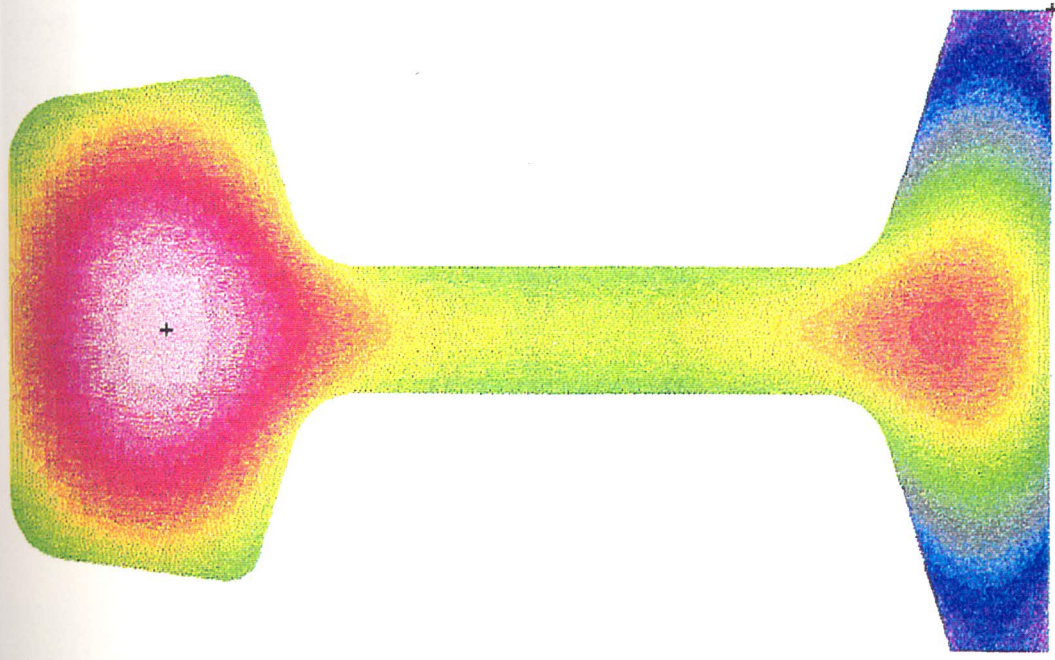
Zeit · Time [s]

Bild/ Fig. 11

# Beispiel 1 Example 1



Temperaturfeld Nr. 10 – Temperature distribution No. 10



Temperaturbereiche [°C]  
 Temperature range [°C]



471.6	—	483.9
483.9	—	496.2
496.2	—	508.5
508.5	—	520.8
520.8	—	533.1
533.1	—	545.4
545.4	—	557.7
557.7	—	570.0
570.0	—	582.3
582.3	—	594.6
594.6	—	606.9
606.9	—	619.2
619.2	—	631.5
631.5	—	643.8
643.8	—	656.1
656.1	—	668.4
668.4	—	680.7
680.7	—	693.0
693.0	—	705.3
705.3	—	717.6
717.6	—	729.9
729.9	—	742.2
742.2	—	754.5
754.5	—	766.8
766.8	—	779.1
779.1	—	791.4
791.4	—	803.7
803.7	—	816.0
816.0	—	828.3
828.3	—	840.6
840.6	—	852.9
852.9	—	865.2
865.2	—	877.5
877.5	—	889.8

Minimum : 472.16  
 Maximum : 889.76

Kühlintensitäten u auf dem letzten Sektor  
 Cooling intensity u in the last sector

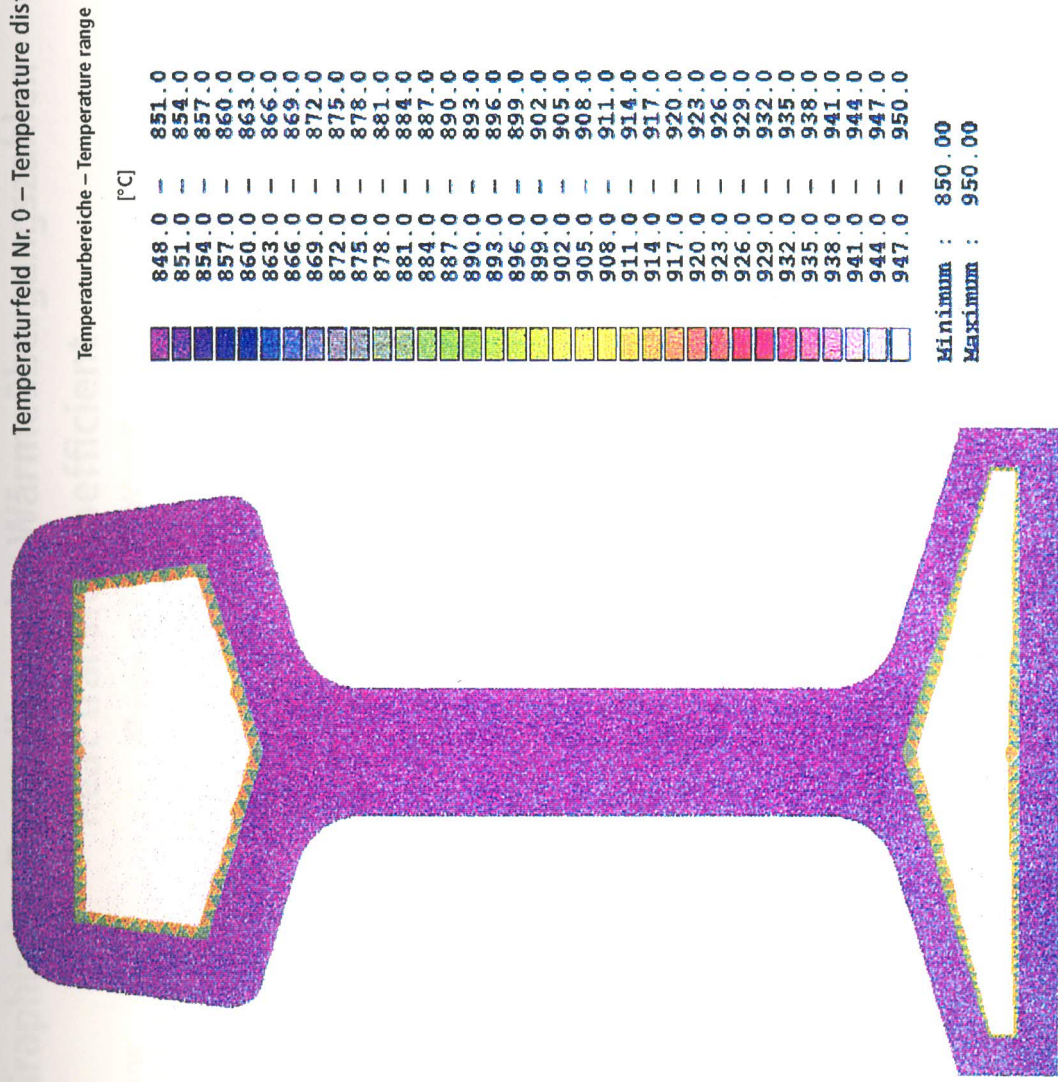
0.355107
0.321032
0.000034
0.272425
0.472379
0.406470
0.436425
0.316110
0.367465

Wärmeübergangszahlen [W/m²K]  
 auf dem letzten Sektor  
 Heat transfer coefficient [W/m²K]  
 in the last sector

523.6	—	633.8
573.0	—	717.9
0.1	—	0.1
536.0	—	584.4
716.3	—	929.4
606.9	—	669.0
619.8	—	656.0
475.2	—	514.6
515.5	—	594.1

Bild/ Fig. 12

Temperaturfeld Nr. 0 – Temperature distribution No. 0



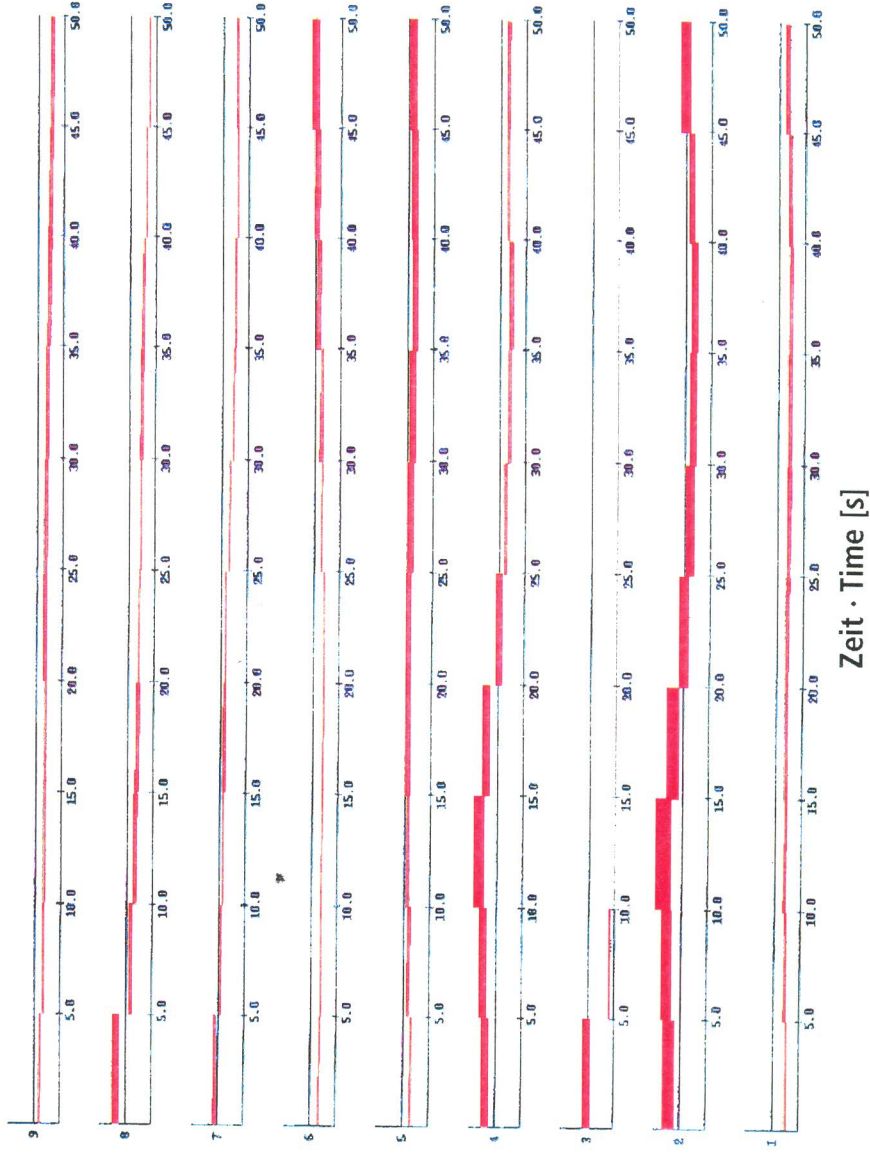
Bild/ Fig. 13

## Graphische Darstellung der Wärmeübergangszahlen

### Heat transfer coefficient

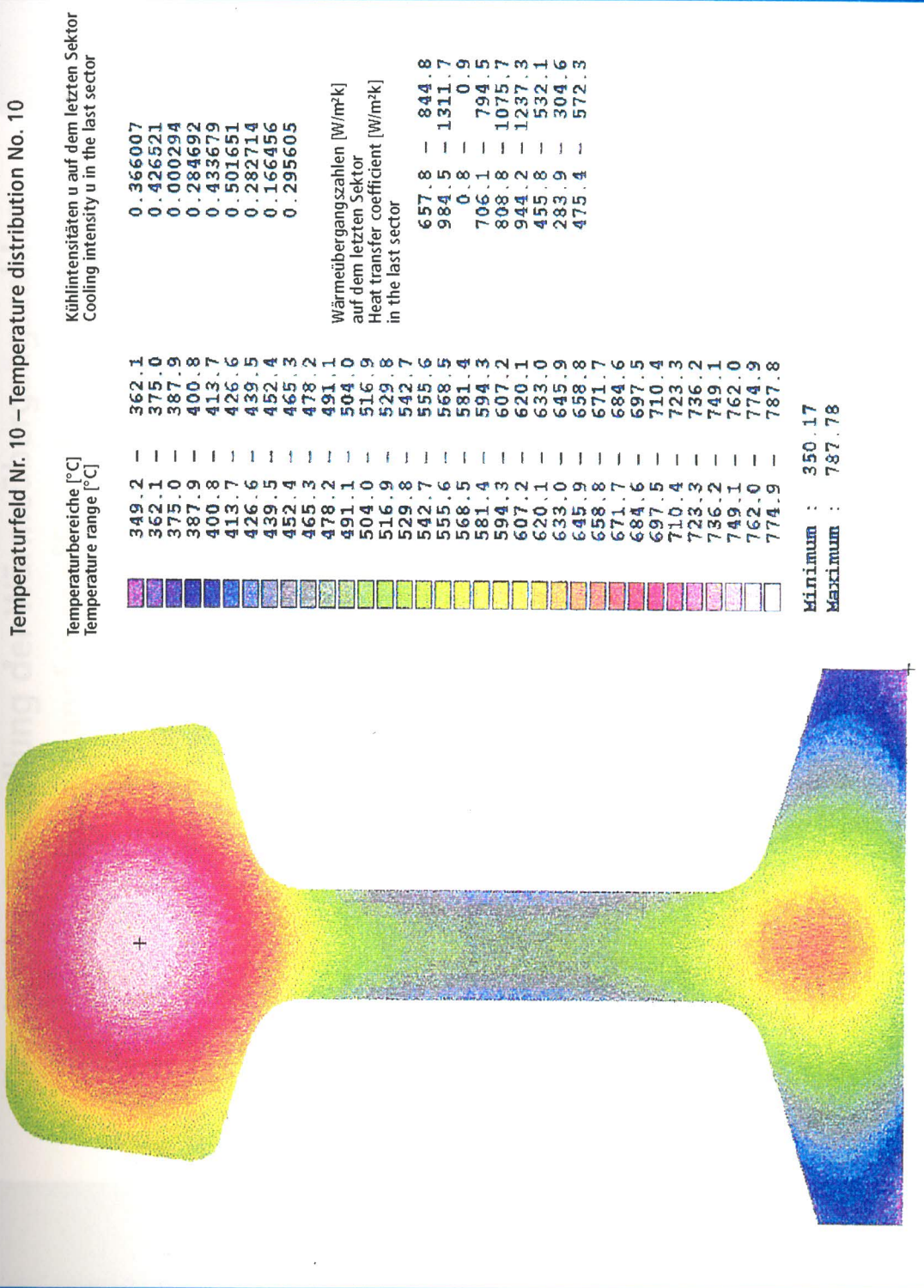
$\alpha_{max} = 2191.0 \text{ W/m}^2\text{K}$

Kühlzone  
Cooling zone



Bild/Fig. 14

# Beispiel 2 Example 2



Bild/ Fig. 15

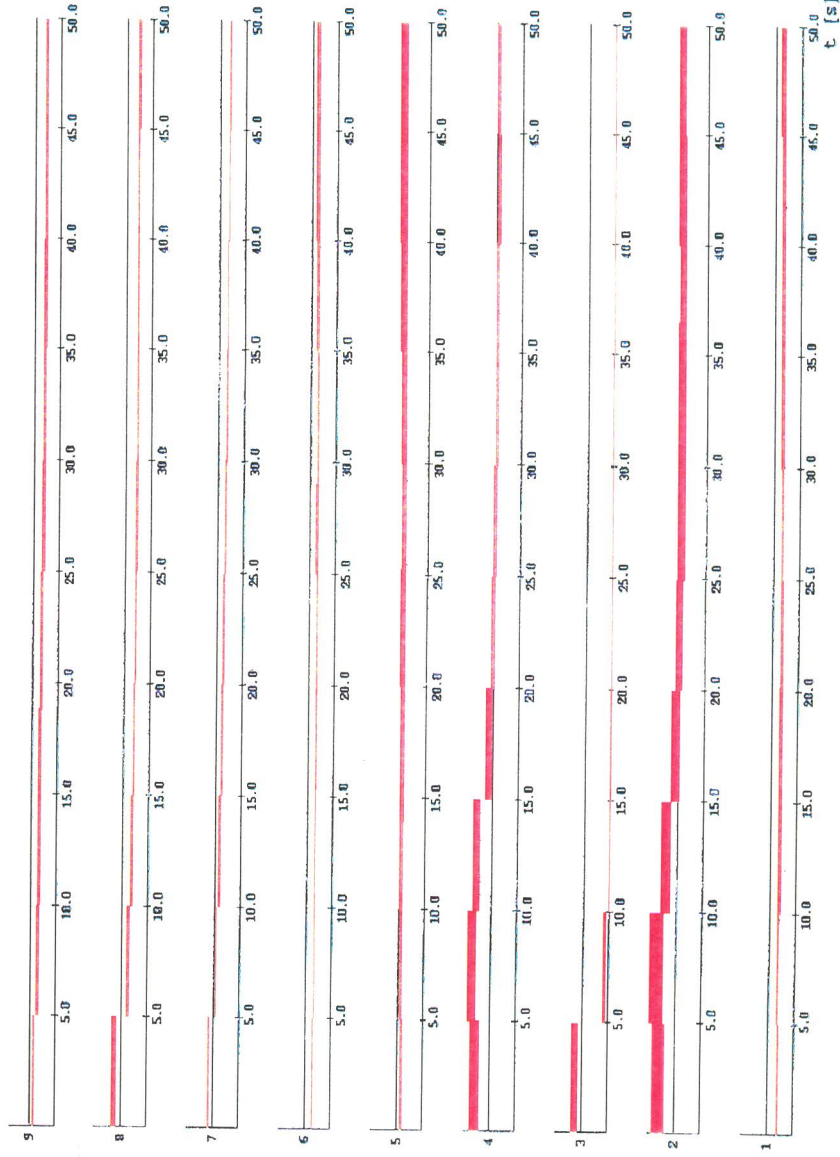


## Graphische Darstellung der Wärmeübergangszahlen

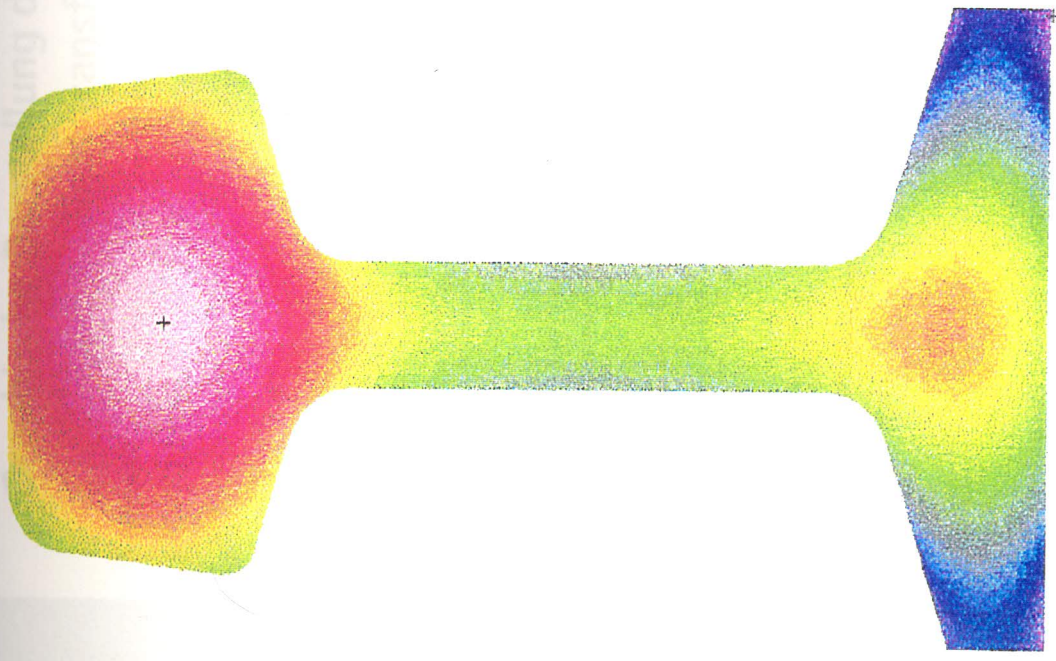
Heat transfer coefficient

$$\alpha_{\max} = 1646.8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Kühlzone  
 Cooling zone



Bild/Fig. 16



Temperaturfeld Nr. 10 – Temperature distribution No. 10

Temperaturbereiche [°C] Temperature range [°C]	Kühlintensitäten u auf dem letzten Sektor Cooling intensity u in the last sector	Wärmeübergangszahlen [W/m²K] auf dem letzten Sektor Heat transfer coefficient [W/m²K] in the last sector
425.2	0.350614	552.8
438.8	0.380455	728.4
452.4	0.000046	0.1
466.0	0.355923	756.4
479.6	0.461574	751.7
493.2	0.380564	588.1
506.8	0.342339	480.0
520.4	0.287326	427.7
534.0	0.315692	434.5
547.6		671.3
561.2		944.1
574.8		0.1
588.4		841.2
602.0		980.9
615.6		713.8
629.2		529.0
642.8		469.6
656.4		
670.0		
683.6		
697.2		
710.8		
724.4		
738.0		
751.6		
765.2		
778.8		
792.4		
806.0		
819.6		
833.2		
846.8		
860.4		
874.0		
887.6		

Minimum : 427.97  
Maximum : 887.60

Bild/ Fig. 17

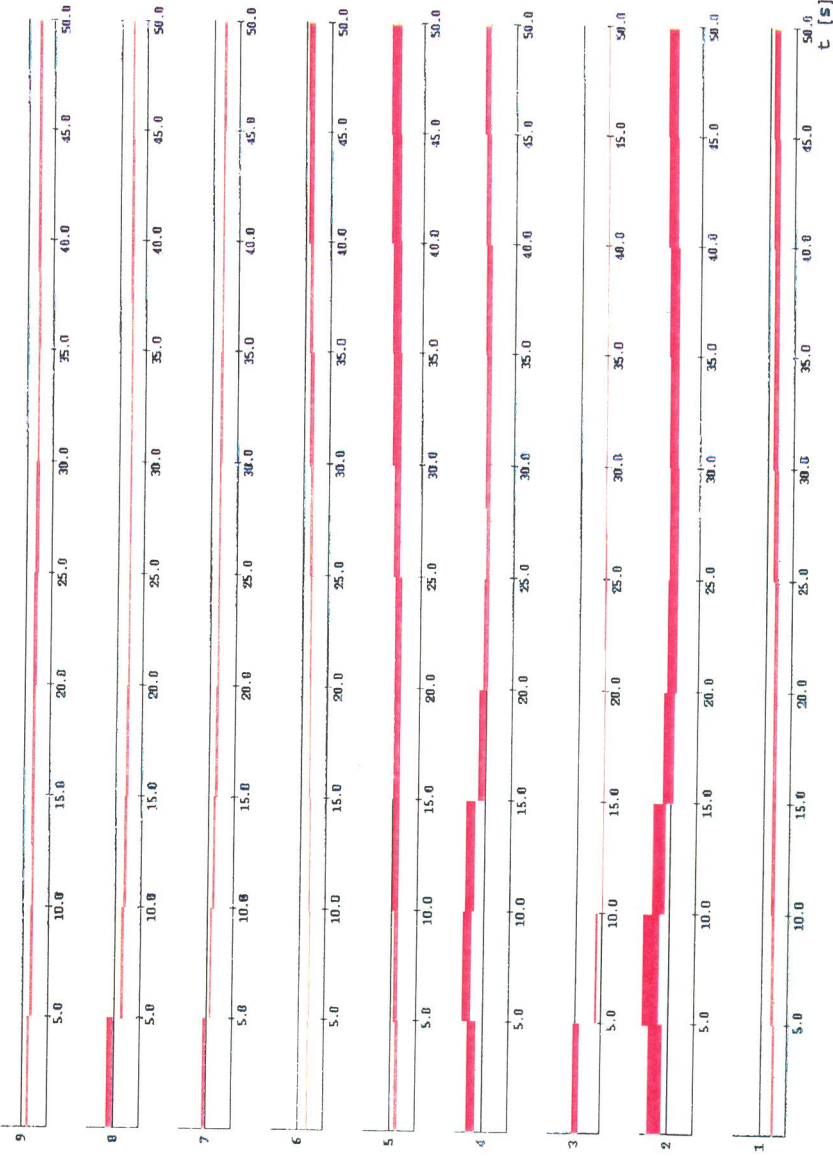
## Graphische Darstellung der Wärmeübergangszahlen

### Heat transfer coefficient

$\alpha_{\text{max}} = 2202.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Kühlzone

Cooling zone



Bild/ Fig. 18

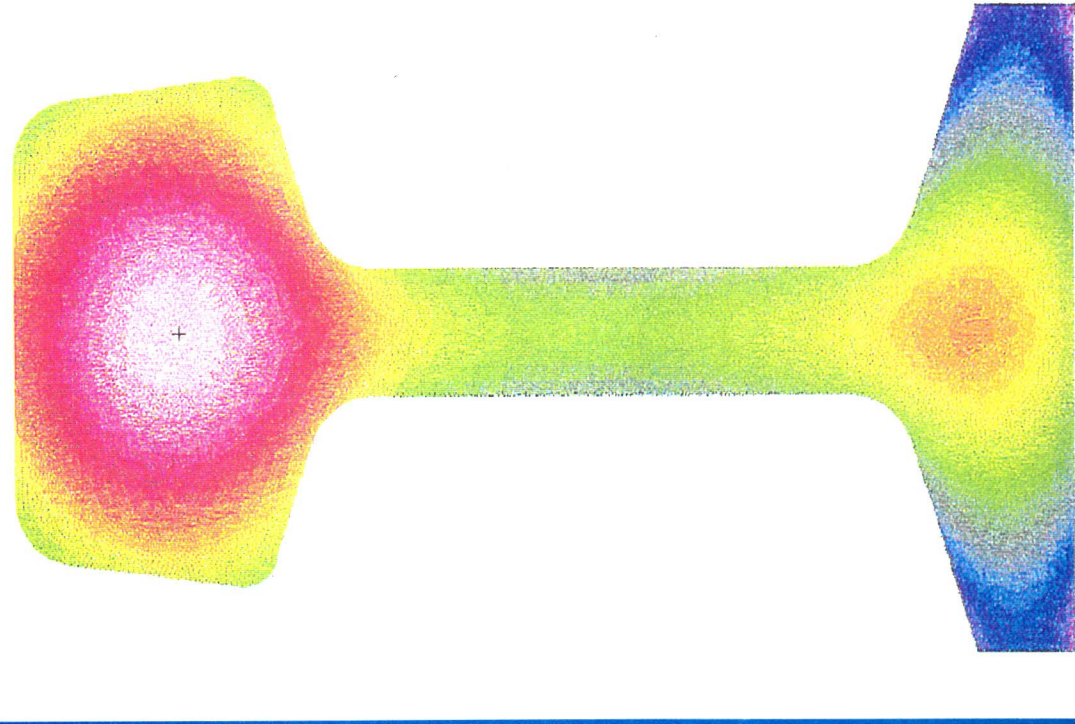
Zeit · Time [s]

# Beispiel 4 (Anfangs-T-Verteilung Example 4 (Start-T-Distribution

# Beispiel 2) Example 2)



Temperaturfeld Nr. 10 – Temperature distribution No. 10



Temperaturbereiche [°C]  
Temperature range [°C]



275.3	–	288.9
288.9	–	302.5
302.5	–	316.1
316.1	–	329.7
329.7	–	343.3
343.3	–	356.9
356.9	–	370.5
370.5	–	384.1
384.1	–	397.7
397.7	–	411.3
411.3	–	424.9
424.9	–	438.5
438.5	–	452.1
452.1	–	465.7
465.7	–	479.3
479.3	–	492.9
492.9	–	506.5
506.5	–	520.1
520.1	–	533.7
533.7	–	547.3
547.3	–	560.9
560.9	–	574.5
574.5	–	588.1
588.1	–	601.7
601.7	–	615.3
615.3	–	628.9
628.9	–	642.5
642.5	–	656.1
656.1	–	669.7
669.7	–	683.3
683.3	–	696.9
696.9	–	710.5
710.5	–	724.1
724.1	–	737.7

Minimum : 277.92  
Maximum : 737.60

Kühlintensitäten u auf dem letzten Sektor  
Cooling intensity u in the last sector

0.350614
0.378289
0.000201
0.361091
0.461577
0.380575
0.342286
0.287355
0.315636

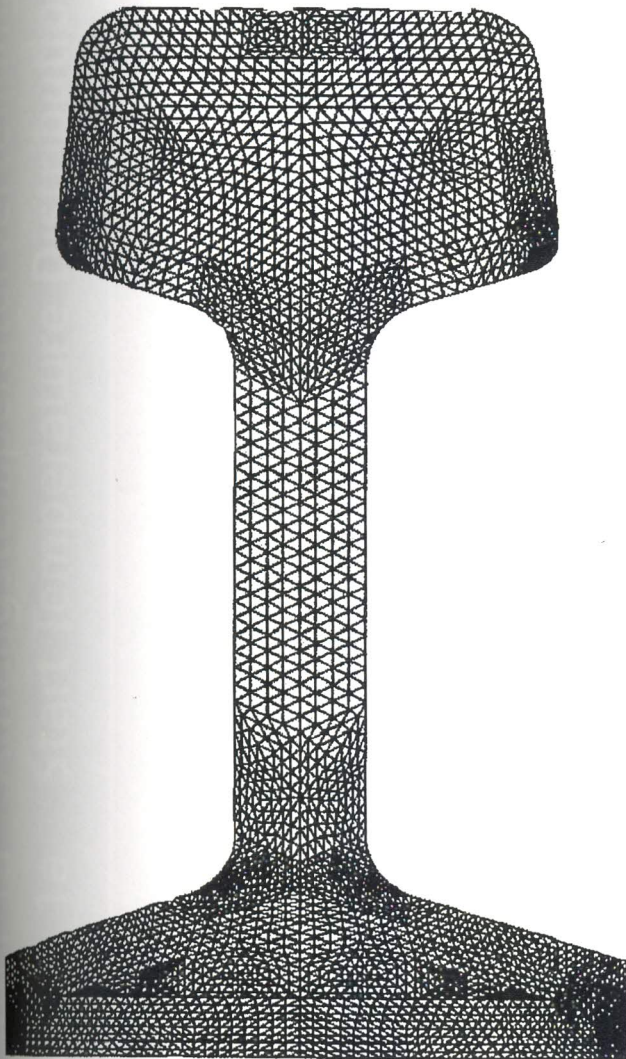
Wärmeübergangszahlen [W/m²k]  
auf dem letzten Sektor  
Heat transfer coefficient [W/m²k]  
in the last sector

724.1	–	941.4
1015.7	–	1495.7
0.7	–	0.8
1130.8	–	1332.4
994.8	–	1445.5
765.6	–	993.2
607.7	–	688.5
550.7	–	622.1
547.5	–	676.5

Bild/ Fig. 19

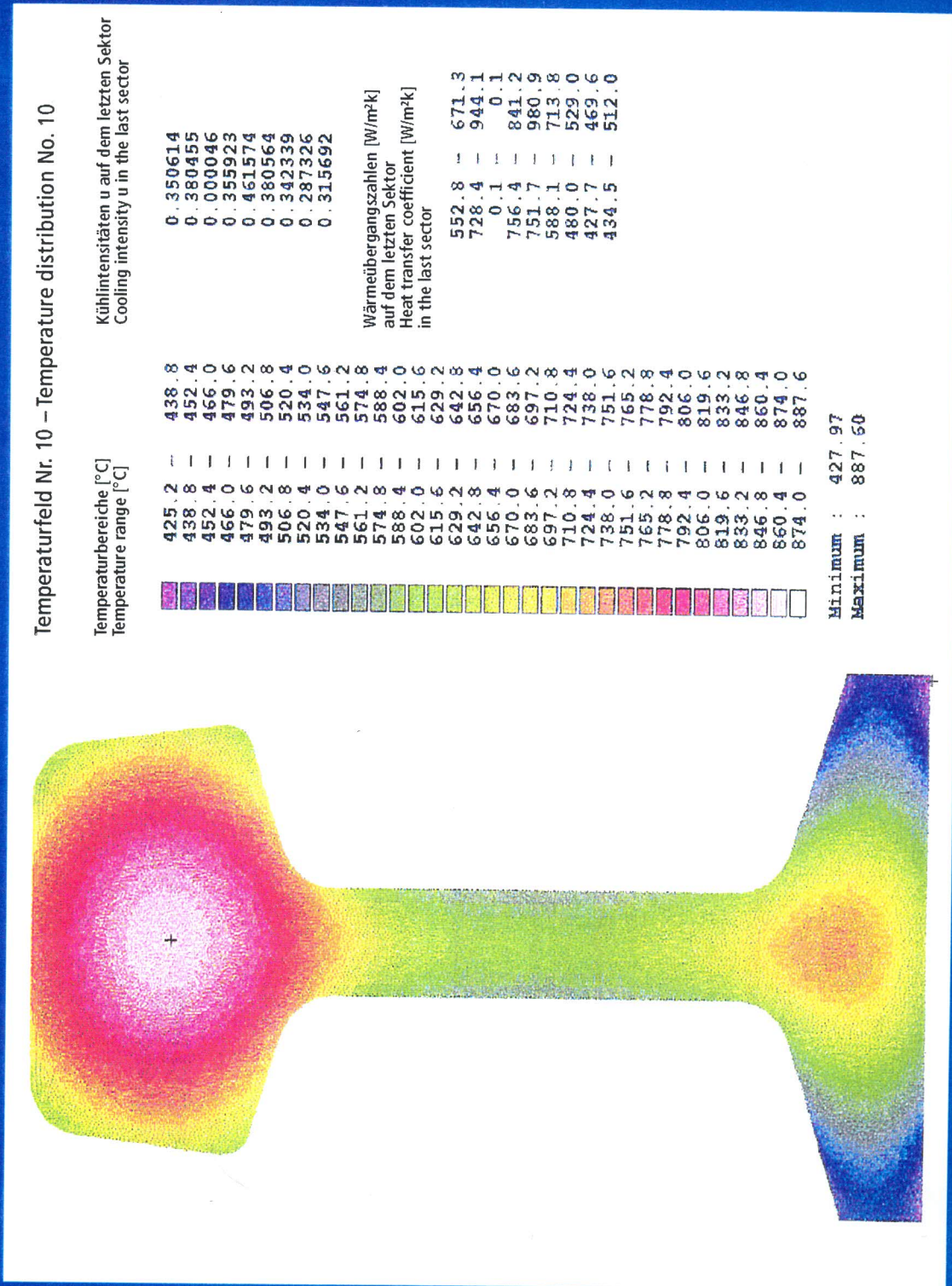


Schienenprofil – Vernetzung  
(Beispiel: 1a, 2a, 5, 6)  
Rail Profile – Grid Calculation  
(Example: 1a, 2a, 5, 6)

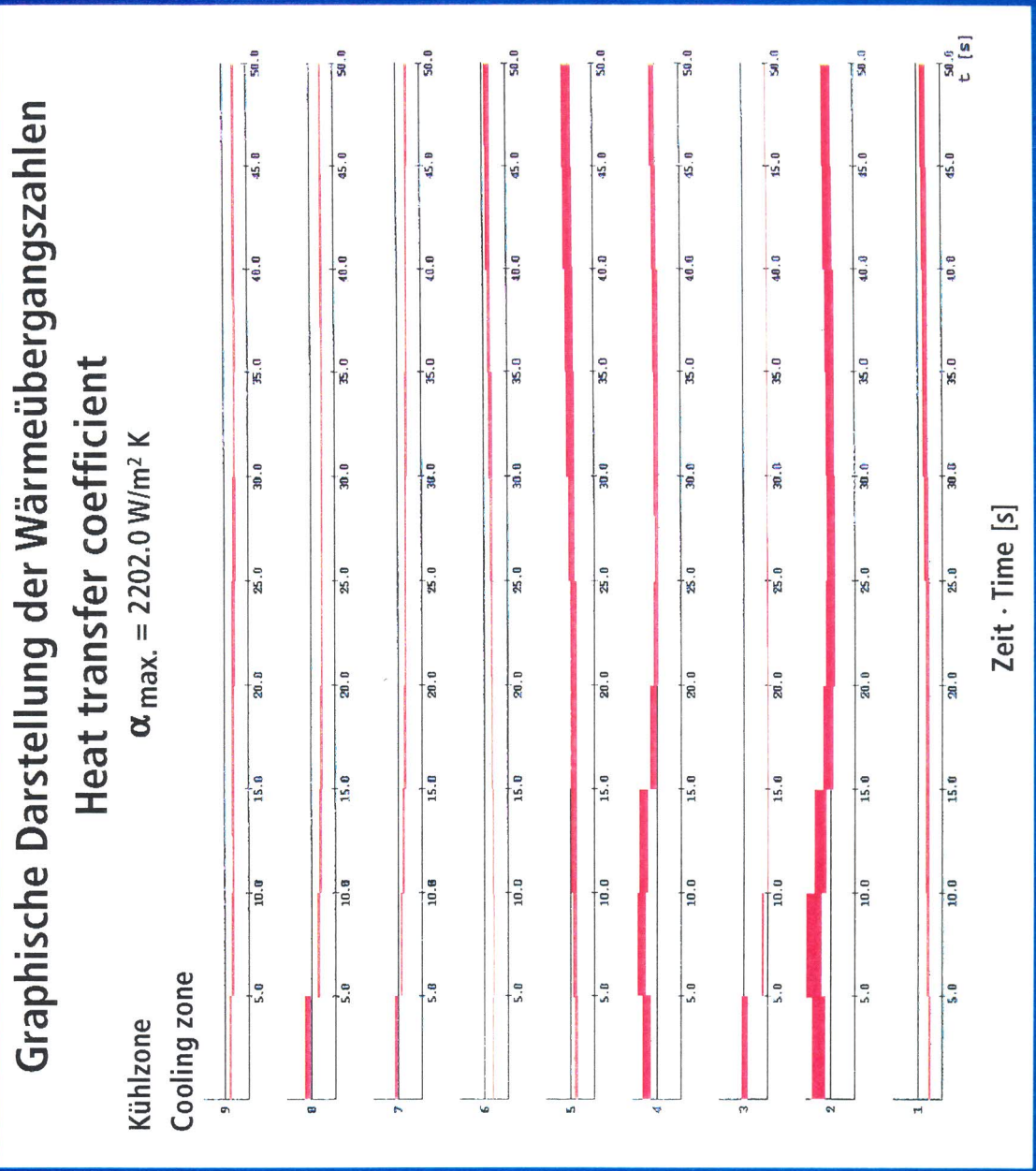


Anzahl der Elemente:  
Number of elements:  
5728

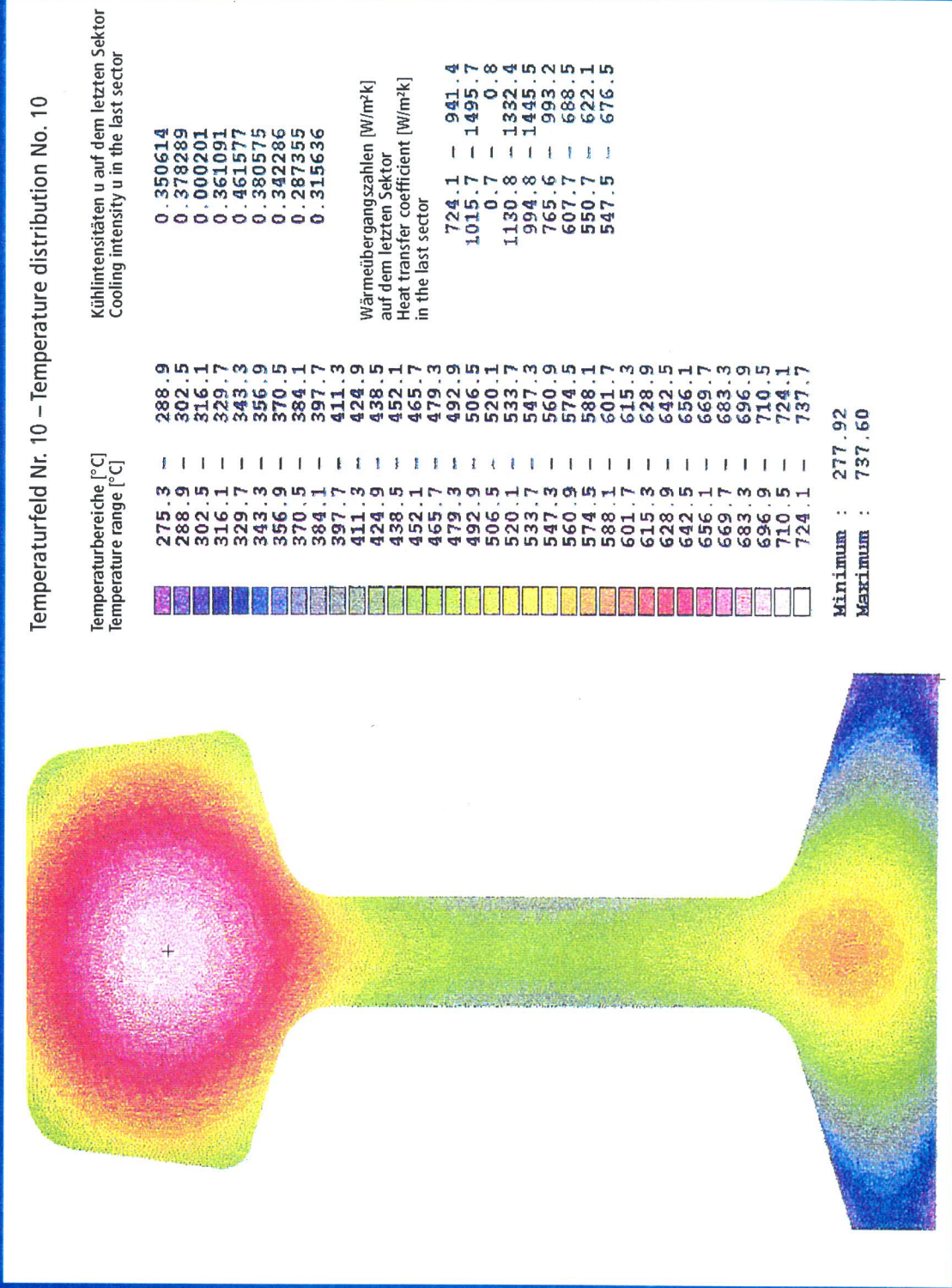
Anzahl der Knoten:  
Number of nodes:  
3029



Bild/Fig. 17



Bild/ Fig. 18



Bild/Fig. 19



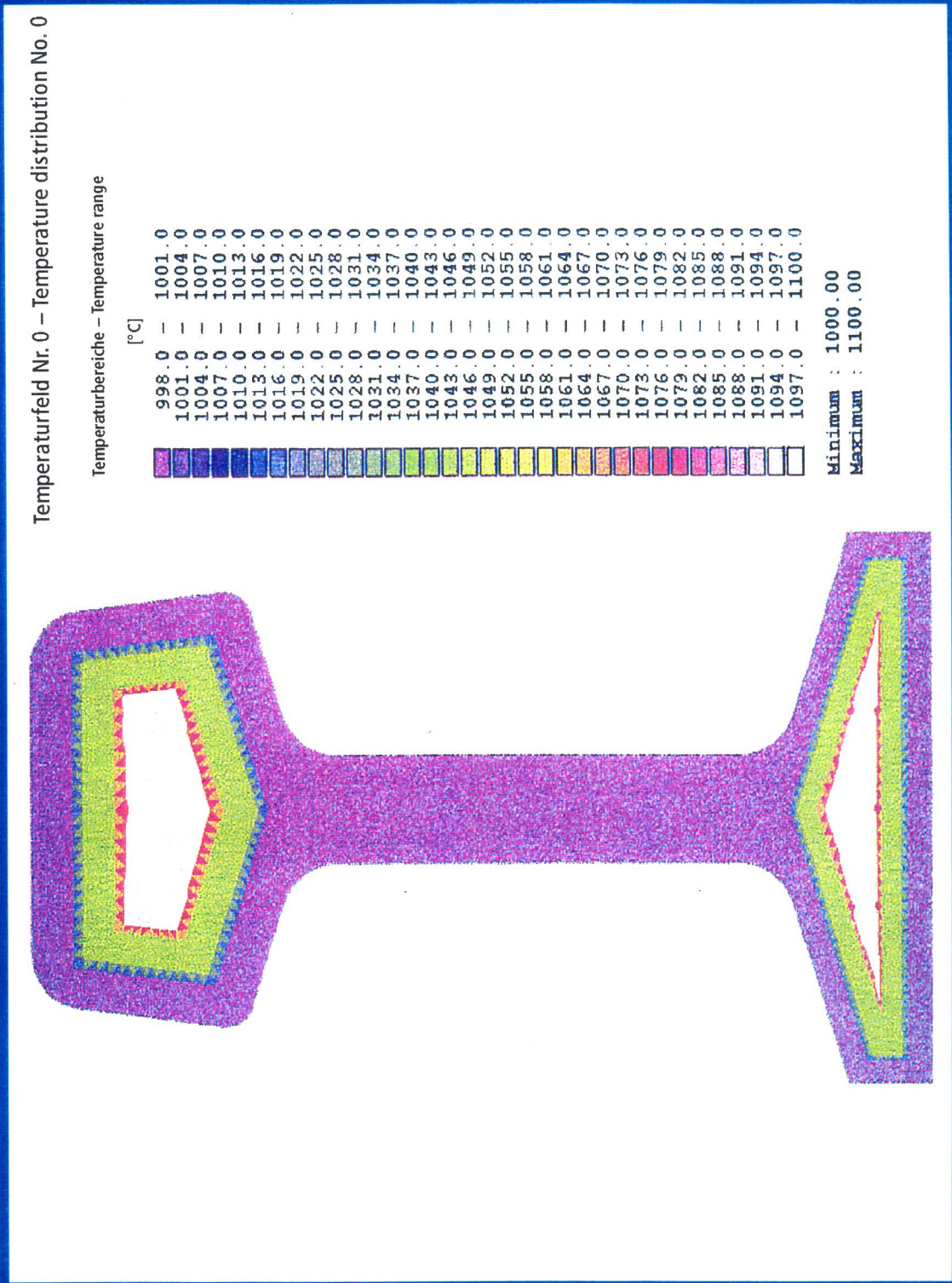


Schienenprofil – Vernetzung  
(Beispiel: 1a, 2a, 5, 6)  
Rail Profile – Grid Calculation  
(Example: 1a, 2a, 5, 6)



Anzahl der Elemente:  
Number of elements:  
5728

Anzahl der Knoten:  
Number of nodes:  
3029



Bild/ Fig. 21

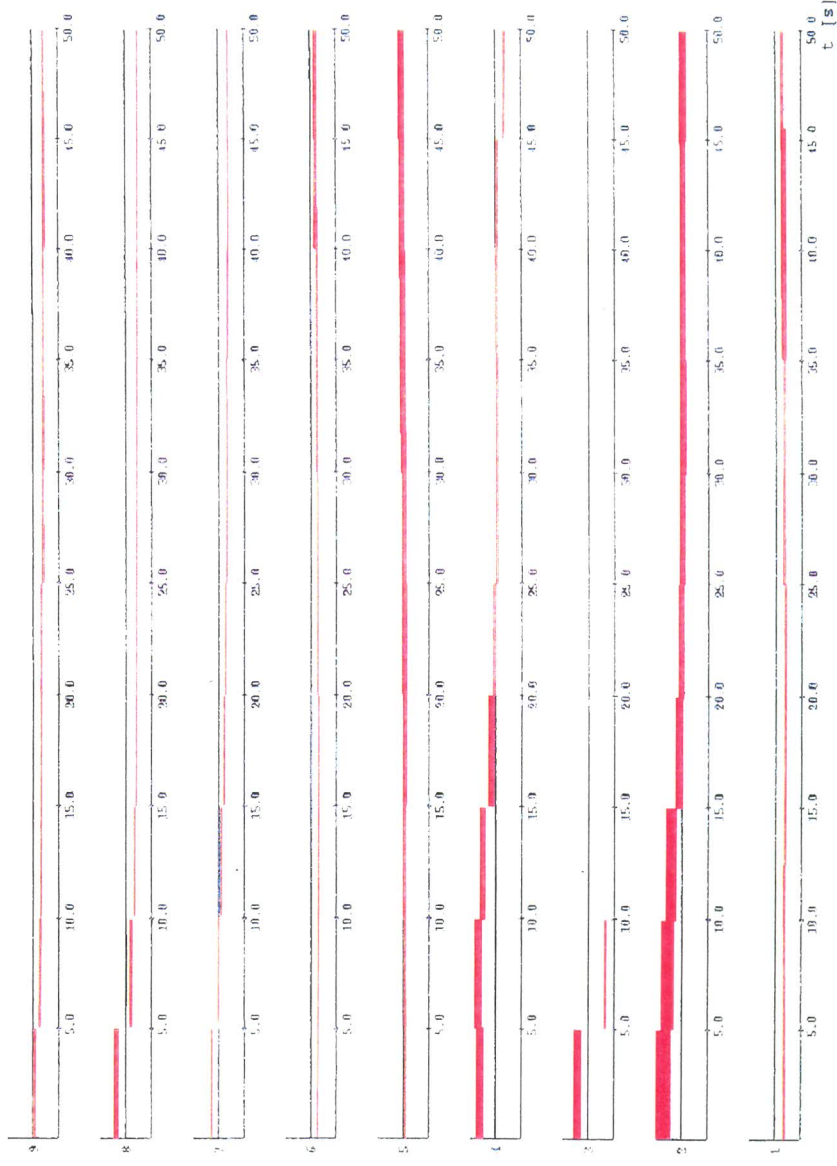
# Beispiel 1a Example 1a

## Graphische Darstellung der Wärmeübergangszahlen

Heat transfer coefficient

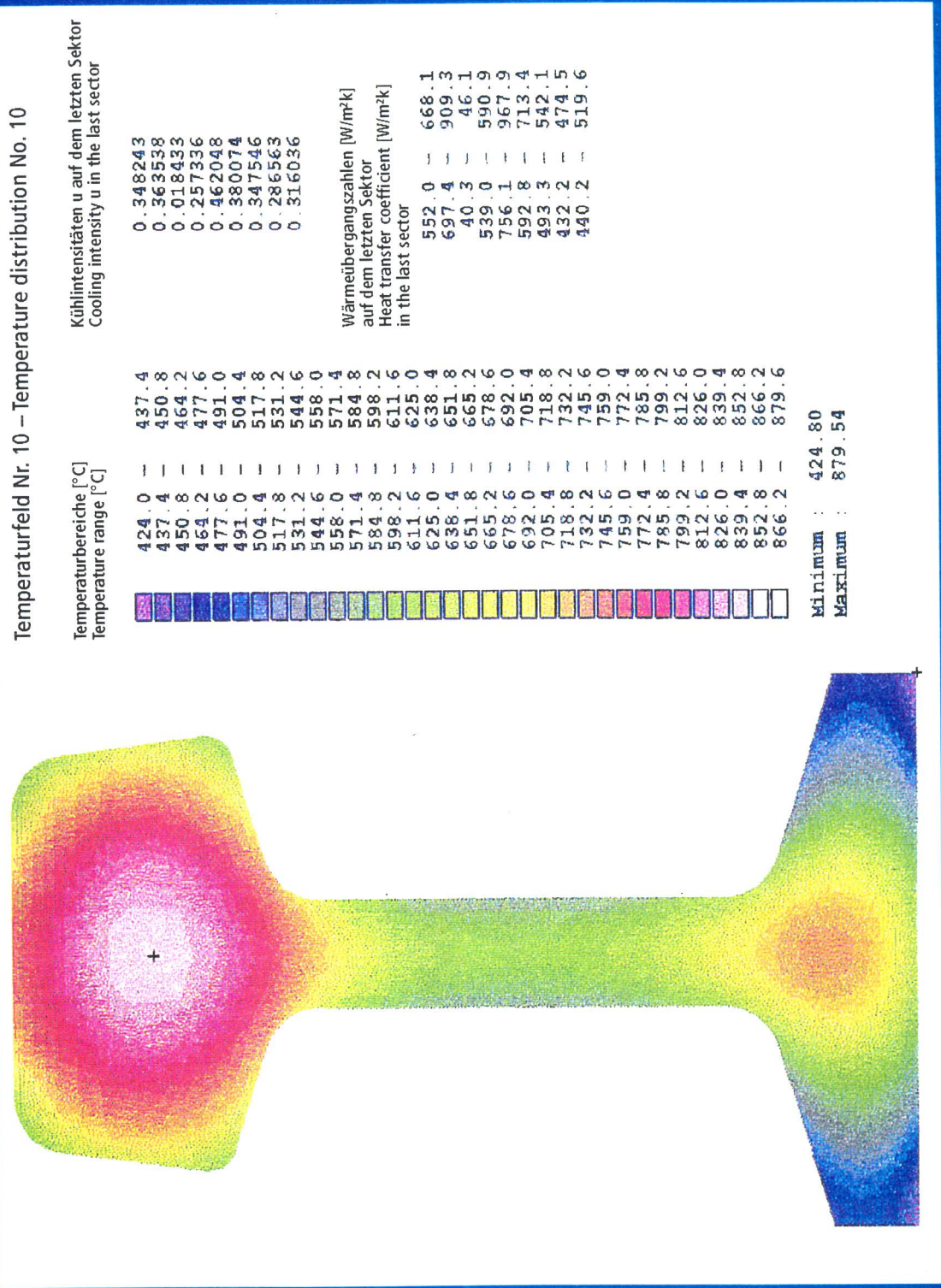
$$\alpha_{\text{max.}} = 1607.4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Kühlzone  
 Cooling zone

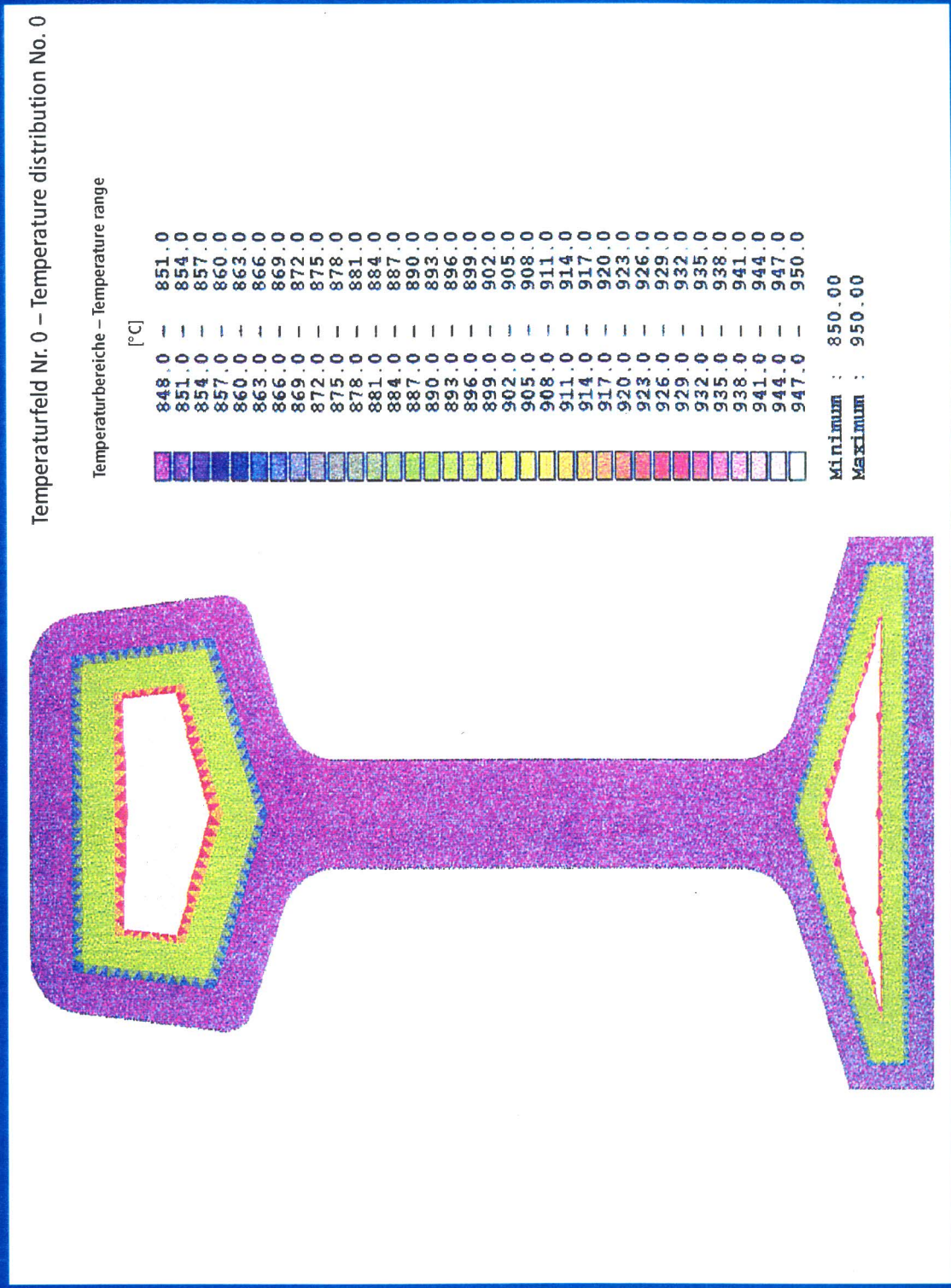


Bild/ Fig. 22

# Beispiel 1a Example 1a



Bild/ Fig. 23



Bild/ Fig. 24

# Beispiel 2a Example 2a

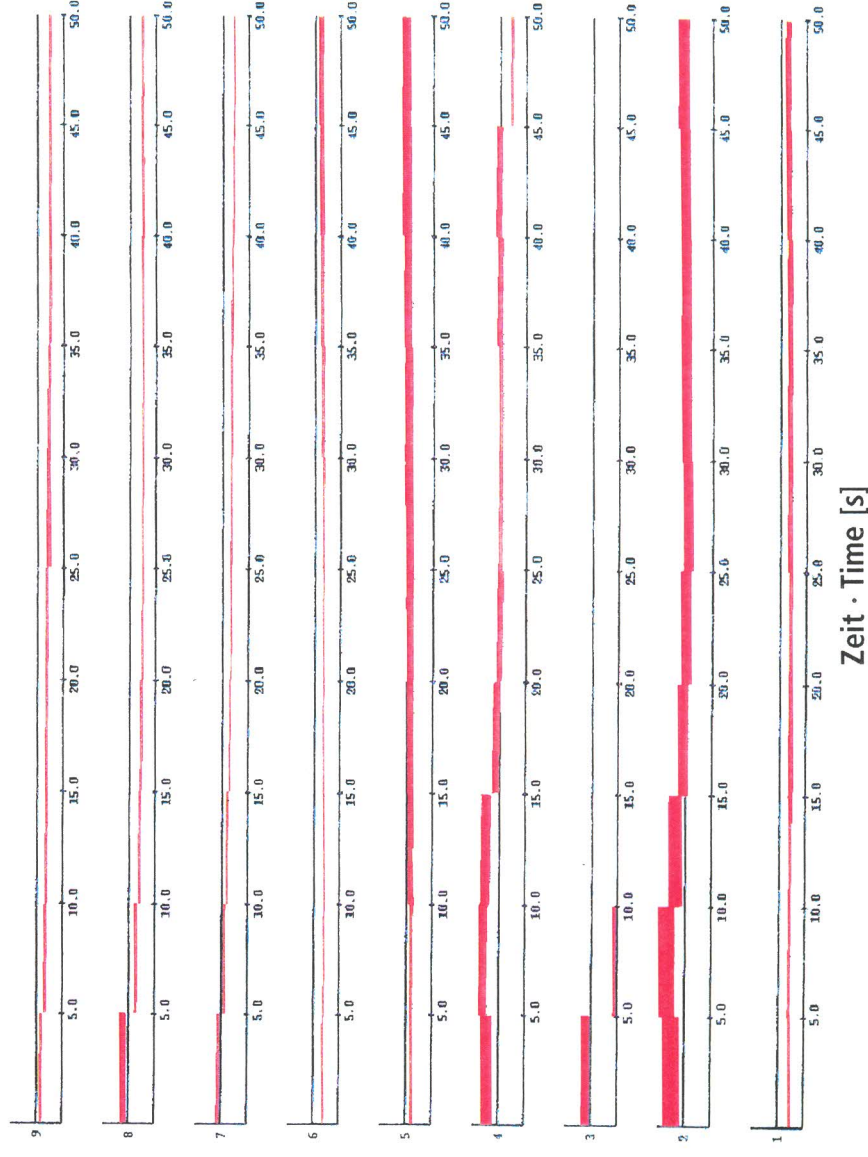


## Graphische Darstellung der Wärmeübergangszahlen

Heat transfer coefficient

$\alpha_{max.} = 2214.2 \text{ W/m}^2\text{K}$

Kühlzone  
Cooling zone

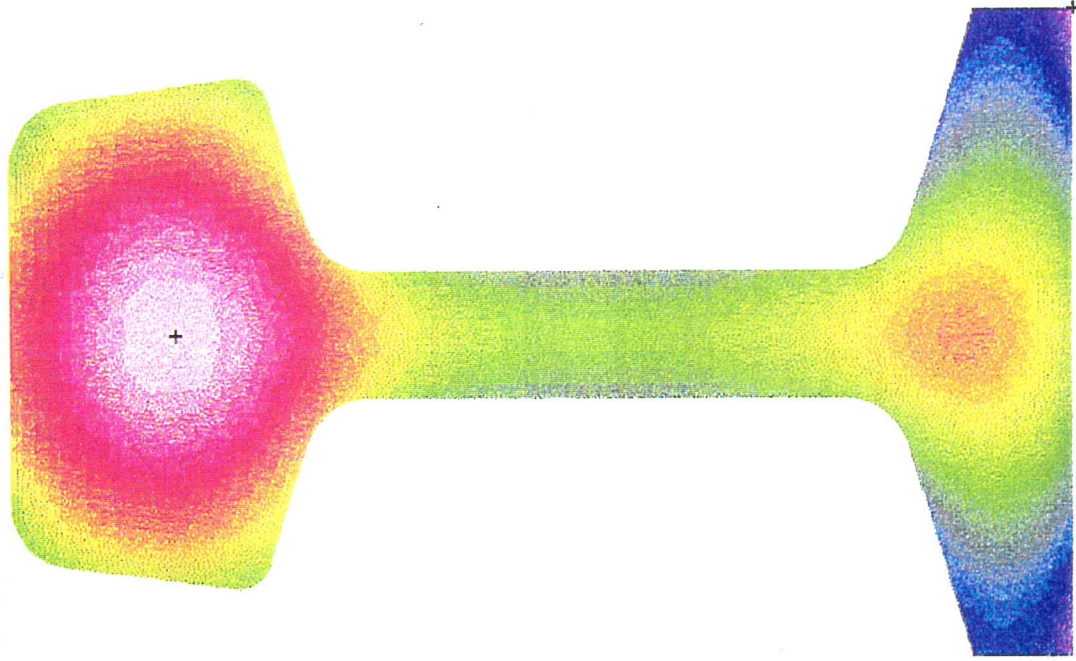


Bild/ Fig. 25

# Beispiel 2a Example 2a



Temperaturfeld Nr. 10 – Temperature distribution No. 10



Temperaturbereiche [°C]  
Temperature range [°C]



274.1	287.5
287.5	300.9
300.9	314.3
314.3	327.7
327.7	341.1
341.1	354.5
354.5	367.9
367.9	381.3
381.3	394.7
394.7	408.1
408.1	421.5
421.5	434.9
434.9	448.3
448.3	461.7
461.7	475.1
475.1	488.5
488.5	501.9
501.9	515.3
515.3	528.7
528.7	542.1
542.1	555.5
555.5	568.9
568.9	582.3
582.3	595.7
595.7	609.1
609.1	622.5
622.5	635.9
635.9	649.3
649.3	662.7
662.7	676.1
676.1	689.5
689.5	702.9
702.9	716.3
716.3	729.7

Kühlintensitäten u auf dem letzten Sektor  
Cooling intensity u in the last sector

0.348039
0.380760
0.000020
0.200941
0.462644
0.380152
0.347657
0.286608
0.316071

Wärmeübergangszahlen [W/m²k]  
auf dem letzten Sektor  
Heat transfer coefficient [W/m²k]  
in the last sector

724.8	944.5
1033.2	1528.7
0.1	0.1
604.4	679.3
1005.0	1404.4
774.0	993.3
626.9	707.8
558.5	631.2
556.5	689.6

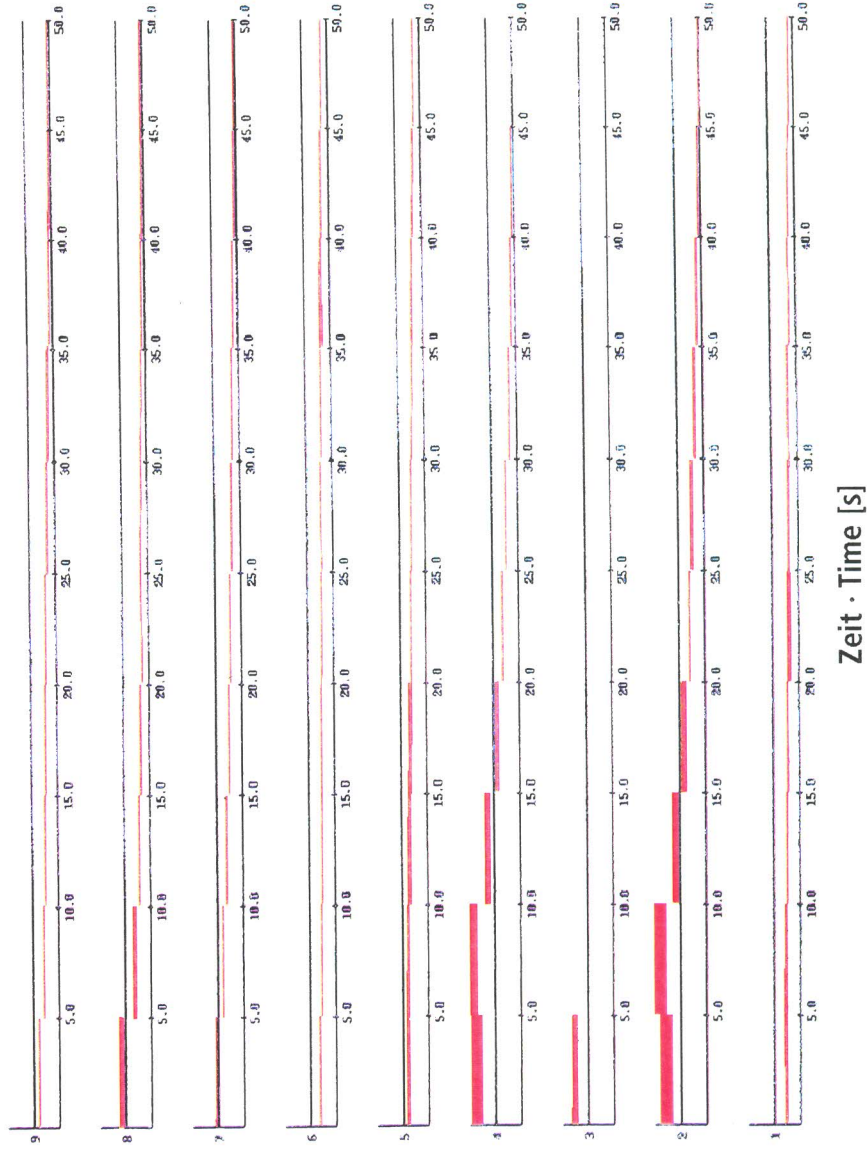
Minimum : 274.07  
Maximum : 729.65

## Graphische Darstellung der Wärmeübergangszahlen

Heat transfer coefficient

$$\alpha_{\text{max.}} = 1531.0 \text{ W/m}^2\text{K}$$

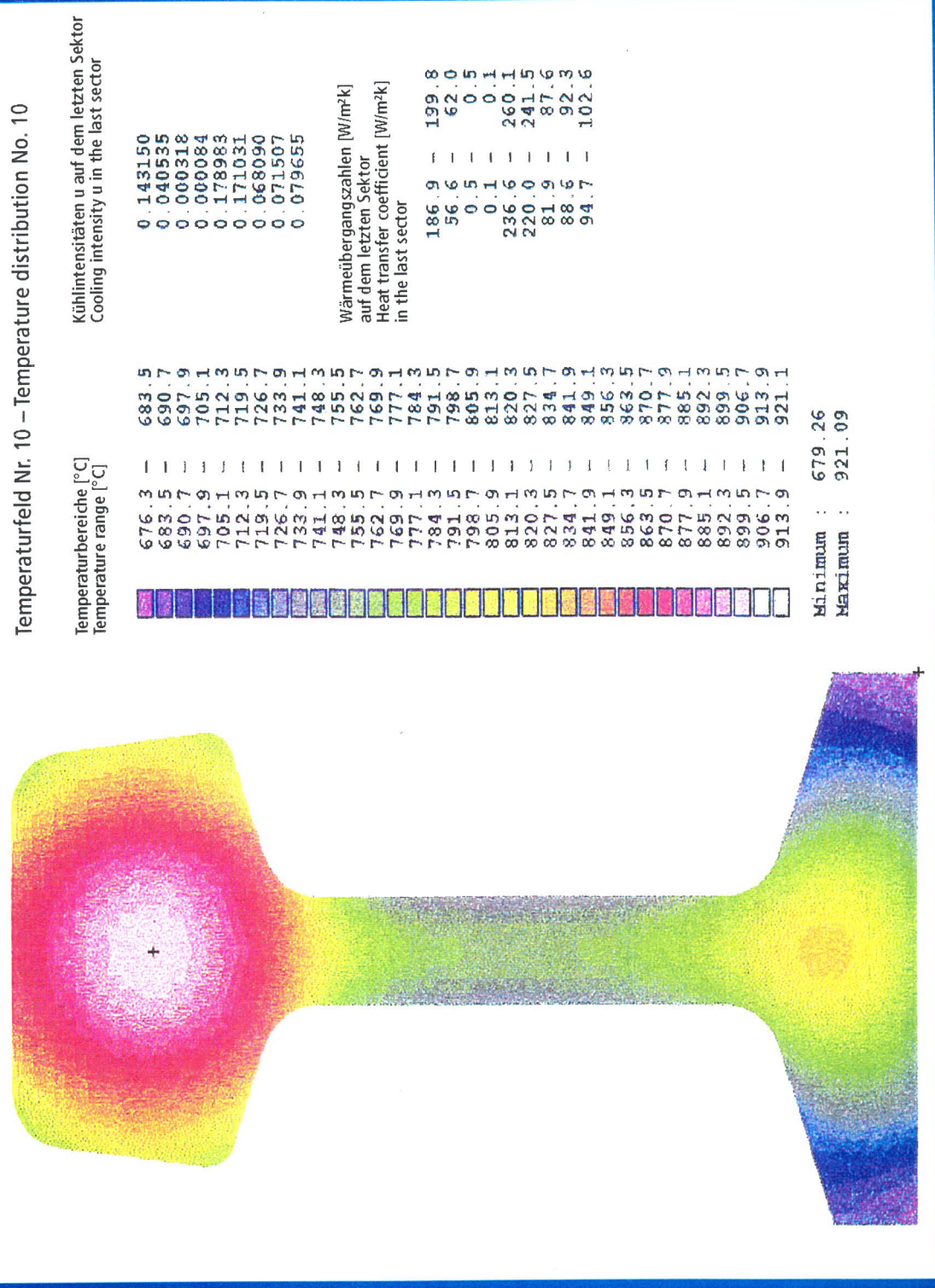
Kühlzone  
Cooling zone





# Beispiel 5 (Anfangs-T-Verteilung Beispiel 1)

## Example 5 (Start-T-Distribution Example 1)



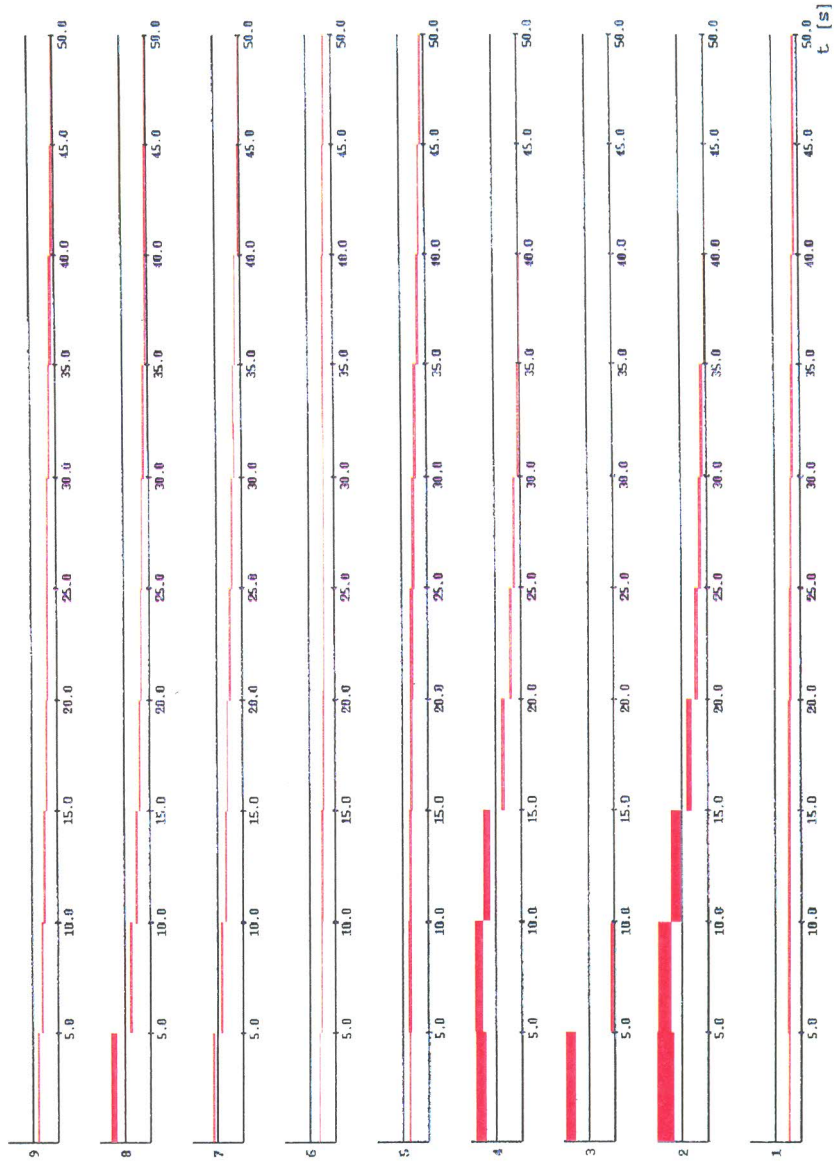
Bild/Fig. 28

## Graphische Darstellung der Wärmeübergangszahlen

Heat transfer coefficient

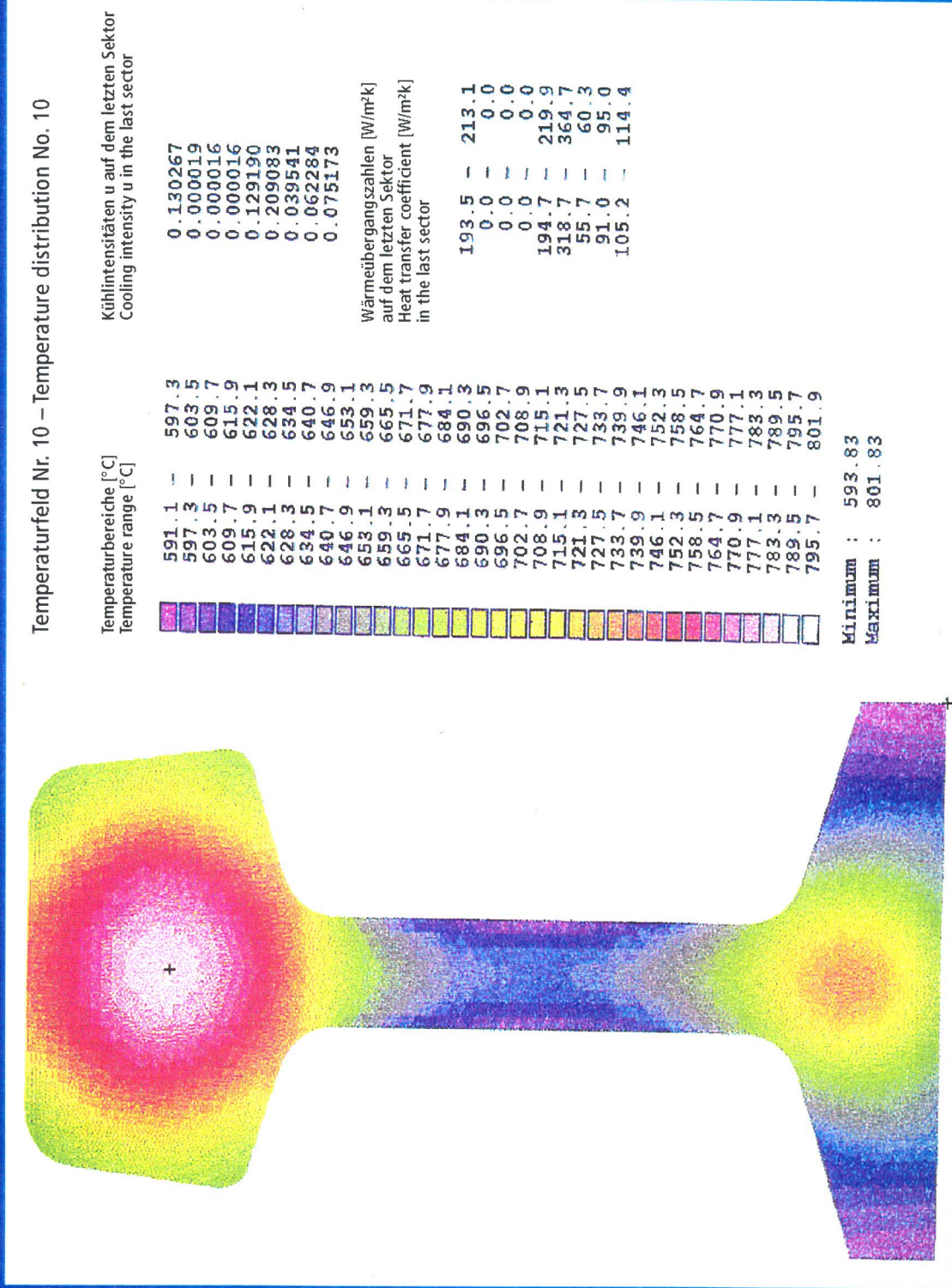
$$\alpha_{\text{max.}} = 1998.4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Kühlzone  
Cooling zone



Zeit · Time [s]

# Beispiel 6 (Anfangs-T-Verteilung Beispiel 2a) Example 6 (Start-T-Distribution Example 2a)



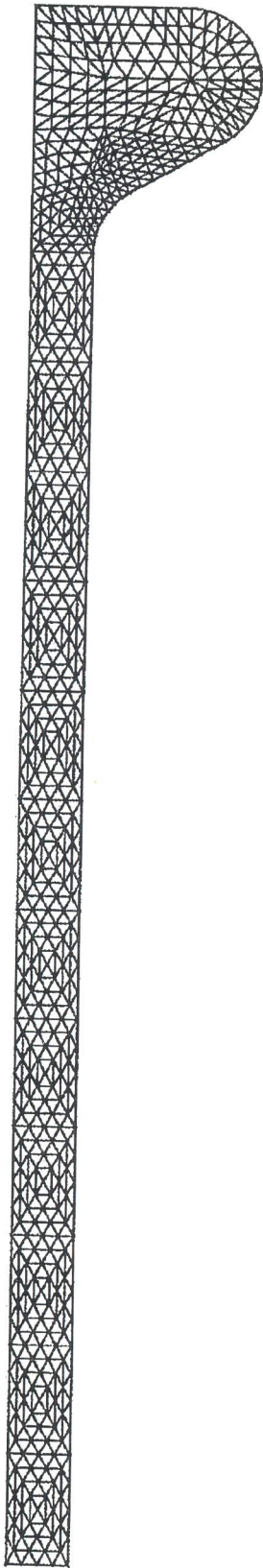
Bild/ Fig. 30



# Flachwulstprofil – Vernetzung Bulb Plate – Grid Calculation



engineering  
Mannesmann  
Demag



Anzahl der Elemente:

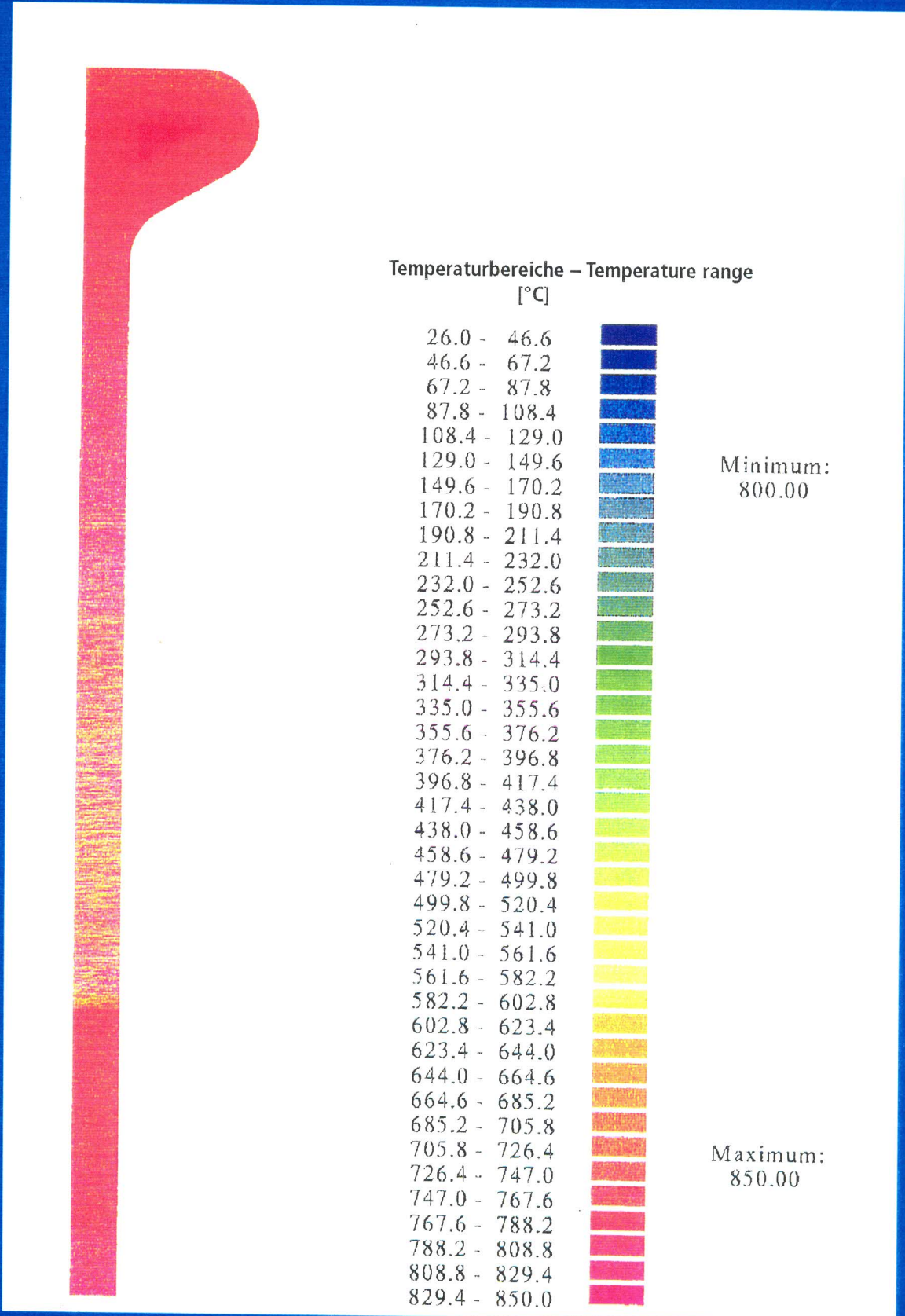
Number of elements:

1216

Anzahl der Knoten:

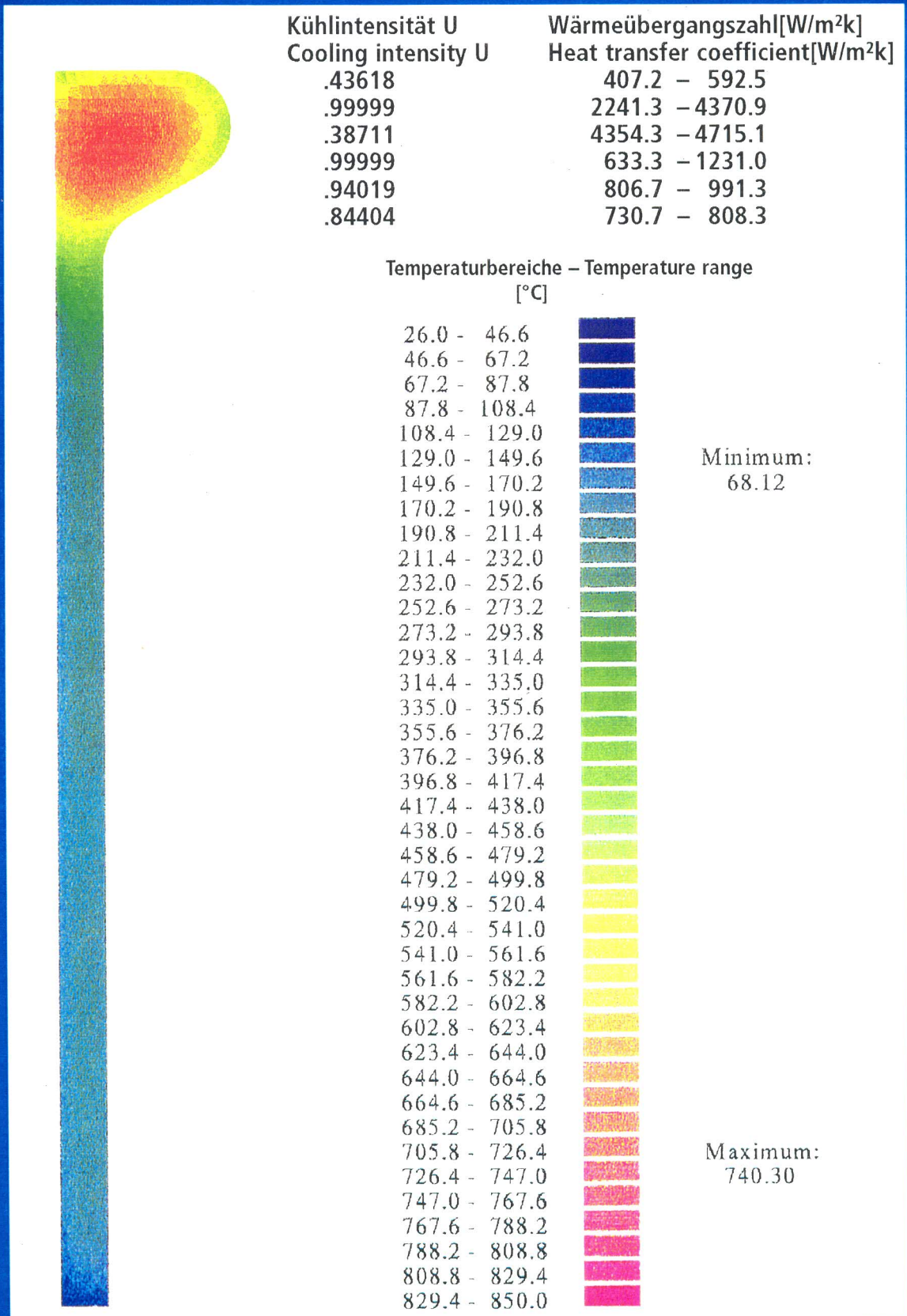
Number of nodes:

689



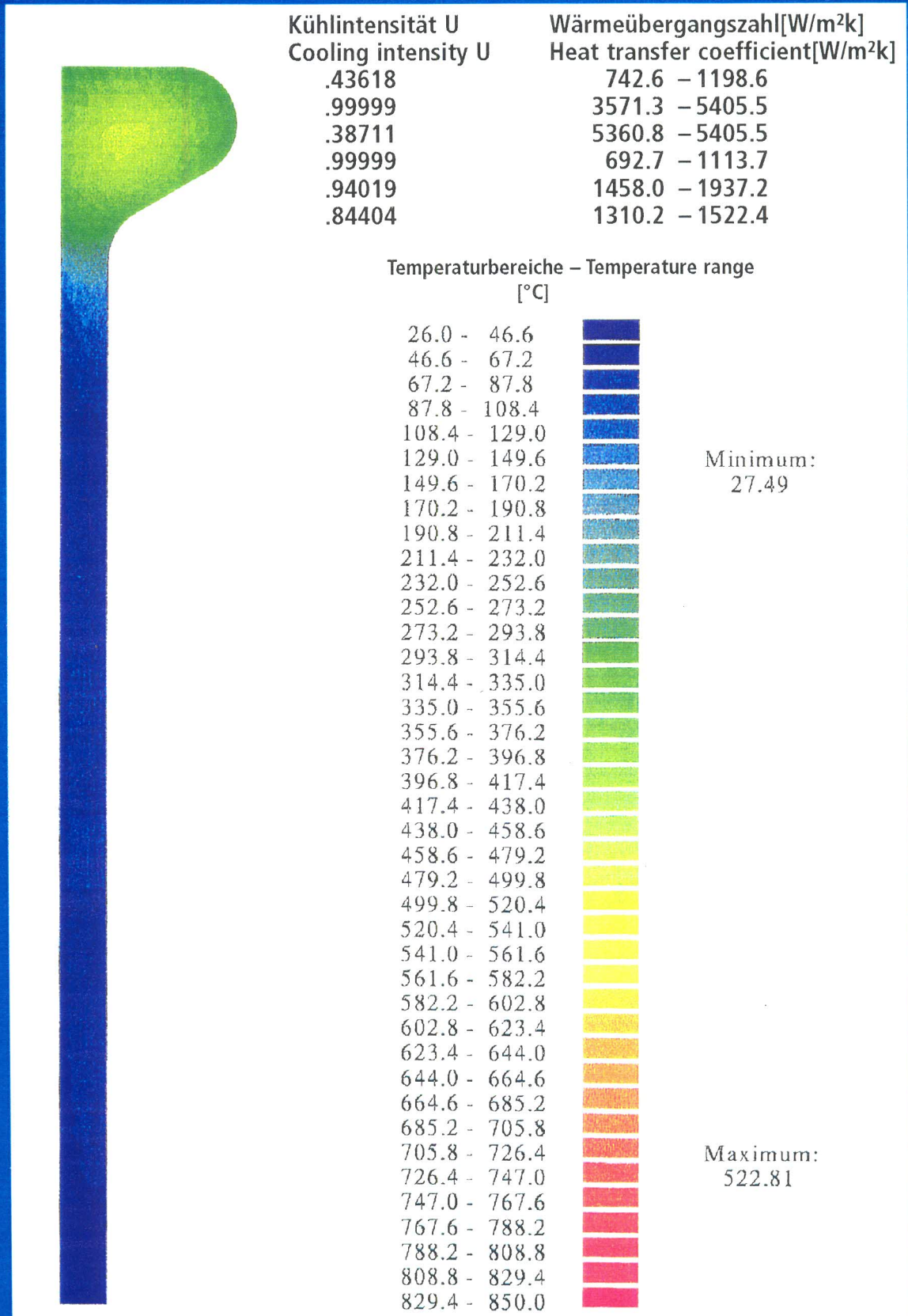
Bild/Fig. 32

Flachwulst –  
Temperaturverteilung nach 50s  
Bulb Plate –  
Temperature Distribution after 50s



Bild/Fig. 33

Flachwulst –  
Temperaturverteilung nach 100s  
Bulb Plate –  
Temperature Distribution after 100s



Bild/Fig. 34

$\alpha$  [W/m<sup>2</sup>K]

$\alpha_{max.} = 5405.52 \text{ W/m}^2\text{K}$

Kühlzone  
Cooling zone



Bild/Fig. 35