

Berechnung von Wärmebehandlungsprozessen – Welche Möglichkeiten hat der Praktiker ?

Calculating heat treatment processes - what possibilities are open to the user in practice?



*Priv.Doz. Dr.-Ing.
Rainer Elsing*

Geb. 1949

*Studium
Maschinenbau/Fertigungstechnik RWTH
Aachen*

*Promotion 1982,
Habilitation 1993*

*Lehrauftrag
an der RWTH Aachen*

*Seit 1990:
Ingenieurbüro Dr. Elsing*

*Priv.Doz. Dr.-Ing.
Rainer Elsing*

Born in 1949

*Studied Mechanical
Engineering/Production
Engineering at RWTH
Aachen (Rhine-Westphalian
Technical University of
Aachen*

*Graduated in 1982,
Lecturing qualification
in 1993*

*Lectureship
in RWTH Aachen*

*Since 1990:
Dr. Elsing Engineering
Office*

Teil I: Temperaturfelder und verwandte Eigenschaften wie Gefüge und Härte

Einleitung

Technische Stähle werden im Laufe der Bauteilfertigung in aller Regel einer Wärmebehandlung unterzogen. Hierbei werden Gefügeeigenschaften wie die prozentualen Anteile von Martensit, Perlit, Ferrit, Bainit und (Rest-)Austenit gezielt eingestellt, um Härte und Festigkeit von Bauteilen auf die gewünschten Werte zu bringen. Die wesentlichen Zusammenhänge bei der Wärmebehandlung werden in Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubildern dargestellt. Diese enthalten für jeden Stahl Angaben zu seinem zeitlichen Umwandlungsverhalten und die resultierenden Eigenschaften, entweder bei konstanter Temperatur (isothermisches ZTU-Schaubild) oder entlang unterschiedlicher Abkühlkurven (kontinuierliches ZTU-Schaubild). Experimentell werden diese Diagramme über Dilatometermessungen mit ergänzenden metallographischen Untersuchungen ermittelt, wobei die Dilatometermessungen auf den mit den Umwandlungen verbundenen Volumenänderungen basieren. In der Praxis ist genau dieser Punkt neben lokalen Überschreitungen der Streckgrenze aufgrund von Temperaturgradienten der Grund für den fast immer auftretenden Verzug in Bauteilen.

Um Ausschussraten zu minimieren und Prozesskosten zu senken besteht der Wunsch, diese komplexen Vorgänge, die das Verhalten und die Eigenschaften eines wärmebehandelten Bauteils primär bestimmen, für konkrete Bauteile schon vor der Wärmebehandlung vorausbestimmen bzw. vorausberechnen zu können.

Voraussetzungen zur Berechnung

Folgende Voraussetzungen müssen hierzu erfüllt sein: Zunächst und vor allem sind eine Reihe von Werkstoffeigenschaften sowie das ZTU-Schaubild erforderlich, zweitens auch das dem Bauteil aufgeprägte Temperaturregime und die zugehörigen Wärmeübergangskoeffizienten. Hierauf wird später eingegangen, vgl. auch Bild 1. Schließlich sind die geometrischen Daten der Bauteile notwendig, denn das Abkühlverhalten ist im Randbereich oft völlig anders als im Kern, wodurch unterschiedliche Rand- und Kernhärte (bzw. Kernfestigkeit) resultieren, und zu guter Letzt braucht man zur Berechnung ein geeignetes Berechnungsverfahren und eine entsprechende Software. Grundsätzlich sind hierfür Finite-Differen-

Part I: Temperature fields and related properties, such as structure and hardness

Introduction

Technical steel is usually subjected to heat treatment during the production of components. Here, specific settings are made for structural characteristics and percentage proportions of martensite, pearlite, ferrite, bainite and (residual) austenite in order to obtain the desired hardness and strength values in the components. The essential connections in heat treatment are represented in time-temperature-transformation curves. These contain information for each type of steel on its time-related transformation behaviour and the resulting qualities, either at constant temperature (isothermal time-temperature transformation curve) or along different cooling curves (continuous time-temperature transformation curve). In experiments, these diagrams are determined by means of dilatometric measurements with supplementary metallographic examinations, whereby the dilatometric measurements are based on the changes in volume associated with the transformations. In practice, it is precisely this point, in addition to locally exceeding the yield point because of temperature gradients, which causes the warpage which almost always occurs in the components.

To minimize the rates of rejects and to reduce process costs, it is desirable with respect to concrete components to determine and calculate in advance the complex procedures which primarily determine the behaviour and properties of a component which is to be subjected to heat treatment.

Calculation requirements

The following preconditions must be filled: firstly, and above all, a series of material properties as well as the time-temperature transformation curve are necessary, secondly, the temperature regime imposed on the component and the corresponding heat transfer coefficients are required. This will be dealt with later, cf. fig. 1 too. Finally, the components' geometrical data are necessary because the cooling behaviour is often completely different on the outer surface from that in the core, resulting in different surface and core hardness (or core strength) and last but not least the calculation requires a suitable calculation method and corresponding software. Fundamentally, the Finite Difference and Finite-Element Methods are suitable for this. These procedures allow numeric solutions from Fourier's equations

zen- und Finite-Elemente-Verfahren geeignet. Diese Verfahren ermöglichen numerische Lösungen der Fourier-Gleichungen zur Beschreibung der Temperaturfelder sowie die Berechnung von Verzugs- und Spannungszuständen aufgrund vorgegebener Temperatur- und Eigenschaftsgradienten im Werkstück.

Eine Reihe von Standard-FEM-Systemen wird seit vielen Jahren in der Praxis zur Lösung derartiger Aufgabenstellungen verwendet, z.B. ABAQUS, ANSYS, MARC, NASTRAN u.a.. Diese Systeme besitzen eine außerordentliche Leistungsfähigkeit, Kapazität und Flexibilität. Dennoch ist die Simulation von Temperaturfeldern und Verzug bei der Wärmebehandlung auch bei diesen Systemen schon eher zu den „fortgeschrittenen“ Anwendungen zu zählen, da sie temperaturabhängige Werkstoffdaten, gekoppelte mechanisch-thermische Berechnungen und die Berücksichtigung eines nichtlinearen mechanischen Materialverhaltens erfordert, und da alle Berechnungen zudem im Zeitbereich erfolgen müssen. Zur sinnvollen Anwendung ist daher eine entsprechend lange Einarbeitungszeit und stetiges Training der Benutzer erforderlich, weshalb derartige Systeme in kleinen und mittelständischen Unternehmen eher selten bis gar nicht anzutreffen sind. Um dennoch auch für diesen Interessentenkreis numerische Berechnungen von Wärmebehandlungsvorgängen zugänglich zu machen, sind Anforderungen an ein Softwaresystem zu stellen, die alle mit dem Oberbegriff „Vereinfachung der Bedienung durch Spezialisierung auf die Fragestellungen der Wärmebehandlung“ zusammengefasst werden können. Im einzelnen bedeutet dies:

Die im Vergleich zu einer einfachen statischen Berechnung sehr viel größere Zahl notwendiger Werkstoffkenngrößen muss anwenderspezifisch in leicht zu pflegenden Datenbanken abgelegt sein. Gleiches gilt für die Prozessdefinition. Hierbei sind das aufgeprägte Temperaturregime und die zugehörigen Wärmeübergangskoeffizienten und ggf. beide Größen abhängig von lokalen Bauteilkoordinaten zu definieren. Weiterhin ist eine einfache Definition für die Bauteilgeometrie notwendig. Die meisten FEM-Programme bieten hier eine Fülle von Modellierungsmöglichkeiten, angefangen von der Definition einzelner Keypoints über gerade und gekrümmte Linien, Polygone, 3D-Standardkörper usw. bis hin zu den Möglichkeiten der Definition von komplexen Körpern mit Boole'schen Operationen und der Übernahme standardisierter CAD-Files. Zur Vernetzung der so definierten Körper steht dann eine Vielzahl – oft weit über 100 – verschiedener Elementtypen zur Verfügung, von denen der Wärmebehandler nur ganz wenige nutzen kann.

Diese enormen Möglichkeiten sind jedoch durchaus reduzierfähig, zumal ein großer Teil der wärmebehandelten Bauteile noch mechanisch nachgearbeitet wird und daher eine Reihe von Details wie Radien, Bohrungen, Nuten, etc. oftmals noch gar nicht vorhanden sind. Zusammengefasst lässt sich also feststellen, dass FDM- und FEM-Programme prinzipiell bestens geeignet sind,



Bild 1: Struktur eine Software zur Prozesssimulation in der Wärmebehandlung

Figure 1: Structure of software for process simulation in heat treatment

to describe the temperature fields and to calculate the warpage and stress on the basis of the set temperature and property gradients in the material.

For many years now, a series of standard FEM systems has been employed in practice to solve such problems. Examples of these are ABAQUS, ANSYS, MARC, NASTRAN etc. These systems have exceptional efficiency, capacity and flexibility. Nevertheless, the simulation of temperature fields and warpage during heat treatment tends to rank among the “advanced” applications in these systems too, as it requires temperature-dependent material data, coupled thermo-mechanical calculations and the consideration of a non-linear mechanical material behaviour, and all calculations must be done in the time range too. A long training period is necessary if these are to be used meaningfully and users must undergo continuous training. This is why such systems are rarely if ever found in small and medium-sized enterprises. Nevertheless, in order to make numerical calculations of heat treatment procedures acces-

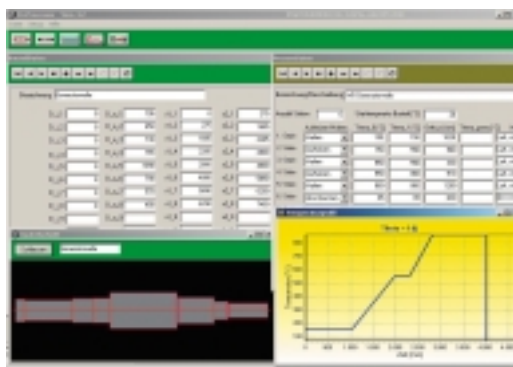


Bild 2: Bauteil- und Prozessdatenverwaltung

Figure 2: Component and process data administration

sible to these types of enterprises also, a software system is required which can combine everything which comes under the heading “operation simplification through specialization in heat treatment problems”. In detail, this means:

The necessary material characteristics, of which a much greater number is required than in simple static calculations, must be stored in easily maintained user-specific databases. The same applies to process definition. Here, the imposed temperature regime and the corresponding heat transfer coefficients and, where appropriate, both variables as a function of local component coordinates have to be defined. Furthermore, a simple definition is necessary for component geometry. Most FEM programmes offer an abundance

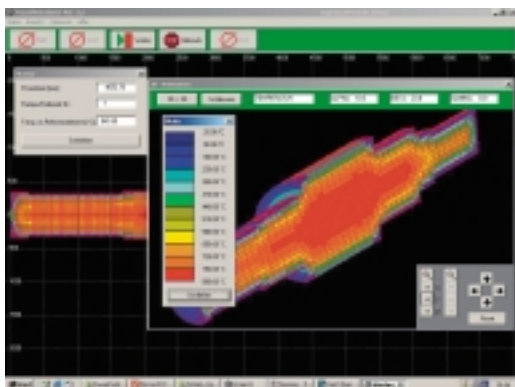
die bei der Wärmebehandlung erforderlichen Berechnungen durchzuführen, dass aber aufgrund der spezifischen Aufgabenstellungen speziell zugeschnittene Softwarelösungen für den Praktiker geeigneter erscheinen als Standardprogramme.

Konzept und Realisierung

Im folgenden wird ein derartiges Softwarekonzept vorgestellt. Es soll den Praktiker bei seinen Fragestellungen unterstützen und ihm Hinweise geben über den Temperaturverlauf in Bauteilen bei der Wärmebehandlung sowie über die

Bild 3: Wärmebehandlung einer Generatorwelle, hier: Abschrecken

Figure 3: Heat treatment on a generator shaft, here: quenching



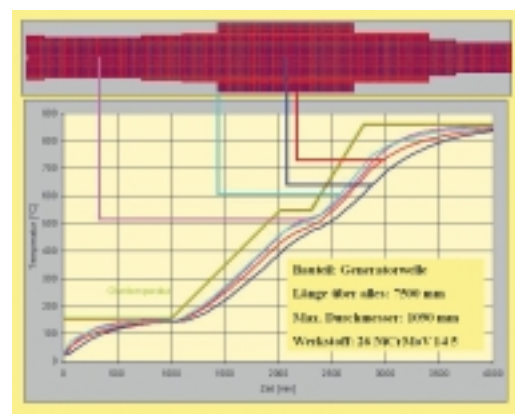
Eigenspannungen und Verzug. Letztere werden im Teil II dieser Veröffentlichung erläutert.

Bild 1 zeigt die Struktur der Software. Das Herzstück bildet der eigentliche Prozesssimulator mit den numerischen Routinen und der Auswertung. Zwar kann der Anwender bei Bedarf über einstellende Optionen Einfluss auf die Arbeitsweise des Systems nehmen, die Elementauswahl, Netzgenerierung, Einführung der kinematischen Randbedingungen etc. laufen jedoch vollautomatisch ab und entlasten den Anwender weitestgehend.

Die Versorgung des Simulators mit Daten erfolgt aus einer Werkstoff-, Bauteil- und Prozessdatenbank. Letztere enthält Daten des Temperaturregimes im Prozess sowie Daten des jeweiligen Umgebungsmediums, also Aufheizgeschwindigkeiten, Haltezeiten, Abschreckmittel, sowie die zugehörigen Wärmeübergangskoeffizienten. Typischerweise werden hierfür Messwerte verwendet, die den Maschinenpark des Anwenders, ggf. die Chargierung sowie die verwendeten Härtmittel berücksichtigen. In Sonderfällen ist es auch möglich, die Wärmeübergangskoeffizienten

Bild 4: Temperaturregime und lokale Bauteiltemperaturen beim Aufheizen einer Generatorwelle

Figure 4: Temperature regime and local component temperatures while heating a generator shaft



of modelling possibilities here, starting with the definition of individual key points over straight and bent lines, polygons, standard 3-D bodies up to the possibilities of defining complex bodies with Boolean operations and the acceptance of standardized CAD files. To connect the bodies defined in this way, there are many - often far more than 100 - different element types of which the heat treatment applicator can use only very few.

However, these enormous possibilities can by all means be reduced, especially as a great proportion of the heat-treated components still require mechanical reworking and accordingly a series of details, such as radii, bore holes, grooves etc. are often not available at all. To sum up, it can be established that FDM and FEM programs are on principle best suited to perform the calculations required in heat treatment but because of the existence of specific problems, specially tailored software solutions would appear to be more appropriate in practice than standard programs.

Concept and realization

Such a software concept is presented in the following. It is intended to help the practical user solve problems and provide him information on the temperature variation in components during heat treatment as well as on residual stress and warpage. The latter will be explained in part II of this publication.

Figure 1 shows the structure of the software. The core is the actual process simulator with the numeric routines and the evaluation. If required, the user may influence the system's method of operation by means of the setting options but the element selection, mesh generation, introduction of the kinematic boundary conditions etc. run completely automatically and relieve the user considerably.

The data is supplied to the simulator from a material, component and process database. The process database contains data on the temperature regime in the process as well as data on the respective ambient medium, accordingly, heating-up rates, holding times, quenchants as well as the associated heat transmission coefficients. In typical cases, the measured values used here are ones which take into consideration the user's machinery, and if appropriate, the charging and the quenching media used. In special cases, it is also possible to measure the heat transmission coefficients in the furnace during heat treatment and to input these into the simulator on-line or to determine the temperatures of the edges of components without contact or with thermocouples and with these data to monitor the temperature distribution on-line from only a few measurements.

For simple handling, the entire data are managed in mask engineering. Figures 2 show the masks for component and process definition in the stand-alone pre-processors with the data to be entered in each case and the data taken into account in simulation. However, when managing material data in particular, it is recommendable to have a connection to material databases

im Ofen während der Wärmebehandlung zu vermessen und online in den Simulator einzulesen oder Randtemperaturen von Bauteilen berührungslos bzw. mit Thermoelementen zu ermitteln und mit diesen Daten ein Online-Monitoring der Temperaturverteilung aus nur wenigen Messdaten zu gewinnen.

Zur einfachen Handhabung wird die gesamte Datenverwaltung in Maskentechnik realisiert. Bild 2 zeigt die Masken für Bauteil- und Prozessdefinition im Stand-Alone-Präprozessor mit den jeweils einzugebenden und in der Simulation berücksichtigten Daten. Insbesondere für die Verwaltung der Werkstoffdaten empfiehlt sich jedoch statt dieses Präprozessors eine Anbindung an Werkstoffdatenbanken, wie z.B. StahlWissen NaviMat (Dr. Sommer Werkstofftechnik). Hier sind nicht nur die grundlegenden Eigenschaftswerte der Stähle abgelegt, sondern ebenso die ZTU-Schaubilder, Gefügezusammensetzungen, Härtewerte etc., mit denen letztlich eine Auswertung der errechneten Temperaturverteilungen und insbesondere auch der Abkühlkurven im Hinblick auf zu erwartende Bauteileigenschaften möglich ist.

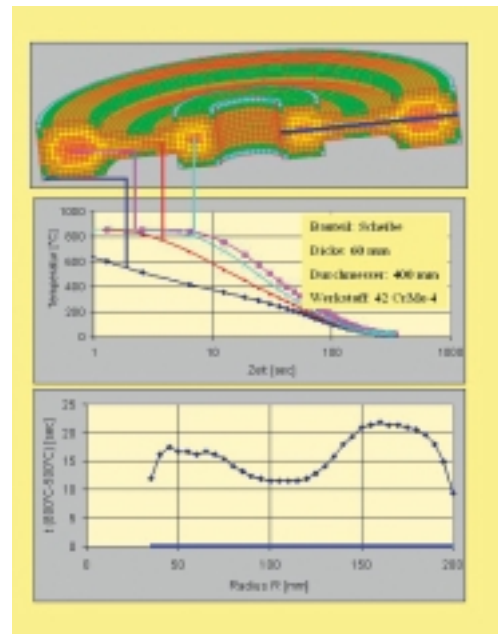
Temperaturfeldberechnung

Bild 3 zeigt den Prozesssimulator bei der Berechnung der Wärmebehandlung einer großen Welle, hier in der Abschreckphase beim Härten. Im Hauptfenster der Anwendung ist ein Bauteilquerschnitt mit der aktuellen Temperaturverteilung in Elementdarstellung zu erkennen, ein perspektivischer Blick auf das aufgeschnittene Bauteil verdeutlicht die Temperaturverteilung zusätzlich.

Primäres Ergebnis dieses Berechnungsschrittes ist die Temperaturverteilung zu jedem Zeitpunkt sowie der Verlauf der Bauteiltemperatur über der Zeit. Bild 4 zeigt den Temperaturverlauf beim Aufheizen an signifikanten Bauteilpositionen. Derartige Simulationen dienen zur Festlegung von Aufheizzeiten zur gleichmäßigen Durchwärmung großer Bauteile. Trotz der hohen Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes vergehen mehrere Stunden, bis gleiche Temperaturniveaus im Werkstück erreicht sind. Mit genauer Kenntnis dieser Verhältnisse kann Ausschuss vermieden und die Prozesszeit optimal angepasst werden.

Bild 5 zeigt den Temperaturverlauf beim Abschrecken einer Scheibe mit Nabe und Kranz von Härtetemperatur in Öl. Die Abkühlkurven können direkt in ZTU-Schaubilder übertragen werden. Hiermit erhält man die Gefügezusammensetzung sowie die Härte im gesamten Körper. Wenn der Simulator mit einem Datenbanksystem kombiniert verwendet wird, so können die Abkühlkurven auch unmittelbar in die dort abgelegten ZTU-Schaubilder eingetragen werden (StahlWissen NaviMat von Dr. Sommer). Für die Praxis zur übersichtlichen Beurteilung des Abkühlverlaufes hat sich die Angabe der Zeit zwischen dem Unterschreiten von 800 und 500 °C eingebürgert. Der Verlauf dieses Kriteriums wird ebenfalls im Simulator ermittelt, und die Ergebnisse sind in Bild 5 für einen radialen Schnitt durch das Bauteil in der Mittelebene angegeben.

such as StahlWissen NaviMat (Dr. Sommer Werkstofftechnik) instead of this pre-processor as these not only store the basic properties of the steel but also the time-temperature transformation curves, structure compositions, hardness values etc. with which in the end it is possible to evaluate the calculated temperature distributions and in particular the cooling curves with respect to the component properties to be expected.



Temperature field calculation

Figure 3 shows the process simulator in the calculation of the heat treatment of a large shaft, here in the quenching stage during hardening. In the main window of application, a component cross section with the current temperature distribution can be discerned in the element representation, a perspective view onto the sectioned component shows the temperature distribution also.

The primary result of this calculation step is the determination of the temperature distribution at every point in time as well as the variation in component temperature over time. Figure 4. shows the temperature variation during heating at significant positions along the component. Such simulations serve to determine the heating times required to ensure that large components will be heated evenly. In spite of the material's high thermal conductivity, several hours elapse until an equal level of temperature is reached throughout the workpiece. With precise knowledge of these factors, rejects can be avoided and the process time ideally adapted.

Figure 5 shows the variation of a quenching temperature in oil while quenching a disk with hub and rim. The cooling curves can be transmitted directly into the time-temperature transformation curves. The structure composition as well as the hardness in the entire body can be obtained in this way. If the simulator used is combined with a database system, the cooling curves can also be entered immediately into the time-temperature transformation curves stored there (StahlWissen NaviMat from Dr. Sommer). In practical applications it has become common to roughly estimate the cooling process by entering the time between the temperature dropping below 800° and reaching 500°. The course of this criterion is also determined in the simulator and the results for a radial section through the component in the centre plane are given in figure 5.

Bild 5: Abkühlkurven und kritische Abkühlzeiten beim Abschrecken eines Werkstückes aus 42 CrMo 4

Figure 5: Cooling curves and critical cooling times while quenching a workpiece made of 42 CrMo 4