

# Beschreibung des zeitlichen Ablaufs der Gefügebildung von Stählen

## Teil 1: Isothermische und kontinuierliche ZTU-Schaubilder



Prof. Dr.-Ing.  
Dr. e.h. Hans-Joachim Eckstein



Dr.-Ing.  
Peter Sommer

Prof. Dr.-Ing. Dr. e.h. Hans-Joachim Eckstein und Dr.-Ing. Peter Sommer

Das breite Eigenschaftsspektrum des Konstruktionswerkstoffs Stahl resultiert aus seinen vielfältigen Gefügeausbildungen. Durch gezielte Temperatur-Zeit-Zyklen lassen sich sehr unterschiedliche Gefüge und damit Eigenschaften einstellen. Als besonders bemerkenswert ist dabei die Tatsache zu erkennen, dass viele Gefügeausbildungen reversibel einstellbar sind. Die Wärmebehandlung ist die technisch-wissenschaftliche Disziplin, die an Vormaterialien und/oder Bauteilen das gewünschte Gefüge mit den definierten mechanischen Eigenschaften einstellt. Die Gefügebildung von Stählen ist dabei ein äußerst komplexer Vorgang, der aber durch aus klaren nachvollziehbaren Gesetzmäßigkeiten folgt.

Die meisten Umwandlungsvorgänge in Stahl sind heterogene Transformationen. Schwankungen oder Unregelmäßigkeiten in kleinen Bereichen, die als Keime bezeichnet werden, stellen dabei die Ausgangspunkte für die Bildung der neuen Phase dar. Im Einzelnen sind die Vorgänge bei der voreutektoidischen Ferrit- und Zementitbildung, der Perlit-, Bainit und Martensitbildung von un- und niedriglegierten Stählen differenziert zu betrachten. Zusätzlich können bestimmte Legierungselemente das Umwandlungsverhalten nicht nur im zeitlichen Ablauf verändern, sondern auch weitere Phasen verursachen.

Die Beobachtung zeigt, dass bei der Umwandlung im Bereich der Perlit- und Bainitstufe je nach Temperaturführung erste Keime bei sehr unterschiedlichen Temperaturen und Zeiten gebildet werden. Sie wachsen in der Folge temperaturabhängig verschieden schnell und die Ausbreitung der neu gebildeten Phase ist deshalb von der Zahl der gebildeten Keime und ihrer Wachstumsgeschwindigkeit abhängig. Im Bereich der Martensitstufe kann nur in Ausnahmefällen ein solches zeit- und temperaturabhängiges Wachstum der neuen Phase beobachtet werden. Der Umwandlungsvorgang läuft bei Stählen meist mit so hoher Geschwindigkeit ab, dass nur die Zunahme der Martensitmenge mit absinkender Temperatur erfasst werden kann.

Die Beschreibung dieser Umwandlungsvorgänge erfolgt in Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubildern. Da es sich dabei nicht um Diagramme im mathematischen Sinne handelt, ist ihre Handhabung und rechentechnische Nutzung mit besonderer Aufmerksamkeit vorzu-

# Description of the time sequence of the formation of structures in steels

## Part 1: Isothermal and Continuous TTT Diagrams

By Prof. Dr.-Ing. Dr. e.h. Hans-Joachim Eckstein and Dr.-Ing. Peter Sommer

The wide variety of properties of the building material steel results from its manifold structural formations. Selective temperature-time cycles can be used to obtain very different structures and thus characteristics. In this respect, the fact that many structural constitutions are reversible is particularly interesting. Heat treatment represents the technical-scientific discipline used to obtain the desired structural constitution with defined mechanical properties for preliminary materials and/or components. With regard to this, the formation of structures in steels is an extraordinarily complex process which, however, conforms with clearly reproducible natural laws.

Most transformation processes in steel are heterogeneous transformations. Fluctuations or irregularities in small areas, known as nucleation, represent the point of origin for the formation of a new phase. Individually, the processes of the pre-eutectoid formation of ferrite and cementite, of perlite, bainite and martensite of unalloyed or low-alloyed steels must be viewed distinctively. In addition, certain alloying elements may change the transformation behavior not only in the course of time, but also cause further phases.

This observation shows that during the transformation in the range of the perlite and bainite stage, depending on the temperature control, initial germs are formed at very different temperatures and times. They grow subsequently, depending on temperature, at various speeds and therefore the propagation of the newly formed phase depends on the number of formed germs and their speed of growth. In the area of the martensite stage, such time and temperature dependent growth in the new phase can be observed in exceptional cases only. In most cases, the transformation process of steels takes place at such high speeds that only the increase of the martensite quantity can be registered with decreasing temperatures.

These transformation processes are described by means of time-temperature-transformation diagrams. Since these are not diagrams in a mathematical sense, they must be handled and utilized for calculations with special attention. Fundamentally, we differentiate between the structural transformation at constant temperature (isothermal transfor-

nehmen. Grundsätzlich wird zwischen der Gefügewandlung bei einer konstanten Temperatur (isothermische Umwandlung) und einer stetigen Abkühlung (kontinuierliche Umwandlung) unterschieden.

### Isothermische ZTU-Schaubilder

Diese Schaubilder wurden erstmals von Davenport und Bain eingeführt und entstehen aus der Verfolgung des mengenmäßigen Umsatzes der Umwandlung bei isothermer Versuchsführung, Bild 1. Nach einer Austenitisierungsbehandlung wird der Probenkörper auf die isotherme Haltetemperatur rasch abgeschreckt und anschließend direkt oder indirekt auf den Ablauf der Umwandlung überprüft. Als dominierende Methode der zeitlichen Verfolgung der Umwandlung hat sich die Dilatometrie durchgesetzt. In modernen Dilatometern wird angegeben, dass die registrierbaren Längenänderungen ca. 1 % der umgewandelten Gefügemengen betragen. In der Vergangenheit wurden auch andere Messverfahren eingesetzt. So sind beispielsweise viele der heute noch verfügbaren isothermischen ZTU-Schaubilder an dünnen Plättchenproben durch Eintauchen in Salzschnmelzen erstellt worden. Nach einer abgestuften Haltedauer wurden diese Proben dann in Salzwasser abgeschreckt und bei der nachfolgenden Gefügebewertung wurde der Martensit als noch nicht umgewandelter Austenit zum Zeitpunkt des Abschreckens bewertet.

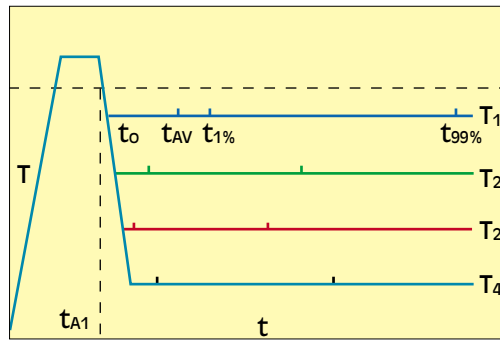
Allen Messverfahren gleich ist die Ermittlung der zeitlichen Gefügebildung in Gefügemengen-Zeit-Diagrammen, Bilder 2 und 3. Aus diesen Kurven wird 1 % der umgewandelten Menge als Umwandlungsbeginn und 99 % als Umwandlungsende definiert. Hieraus entstehen die typischen Umwandlungslinien in den isothermischen ZTU-Schaubildern, Bild 4a und 4b.

Die Reproduzierbarkeit solcher Mengen-Zeit-Kurven hängt in hohem Maße von verschiedenen, nachfolgend aufgelisteten Faktoren ab:

- der erzielbaren Abschreckgeschwindigkeit auf die jeweilige Haltetemperatur
- der gleichmäßigen Abkühlung des Probekörpers
- der Einhaltung einer isothermen Temperaturführung
- der Empfindlichkeit der direkten oder indirekten Mengenmessung
- der Einhaltung eines definierten Austenitisierungszustands

Bei der Übertragbarkeit auf Stähle gleicher Bezeichnung ist zudem die aktuelle chemische Zusammensetzung aller Legierungselemente zu berücksichtigen. Im strengen Sinn gilt ein ZTU-Schaubild stets nur für die dort hinterlegten experimentellen Randbedingungen.

Eine merkliche Verfälschung der Mengenkurven entsteht auch dann, wenn bei der Umwandlung die umwandlungsbedingte Wiedererwärmung (Rekaleszenz) nicht unterdrückt werden kann. Die Erwärmung der Proben ist



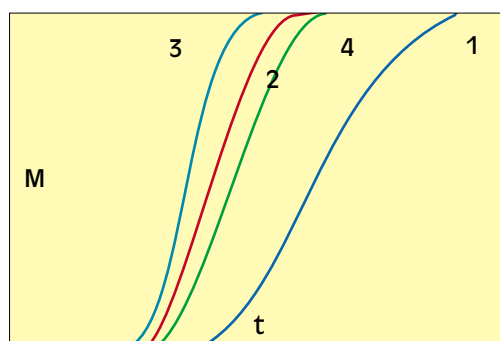
**Bild 1:** Schematische Darstellung der Versuchsführung bei isothermischen Umwandlungen

**Fig. 1:** Time-temperature-curves at isothermal transformation (schematic)

mation) und and continual cooling (continual transformation).

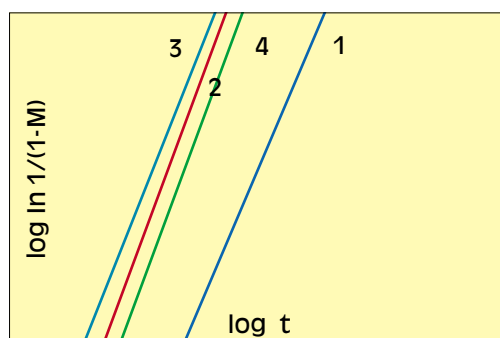
### Isothermal TTT Diagrams

These diagrams were initially introduced by Davenport and Bain and are created from tracking the quantity-related conversion of the transformation at isothermal testing, Fig. 1. After austenizing treatment, the test sample is quickly quenched to the isothermal holding temperature and subsequently inspected directly or indirectly for the course of transformation. Dilatometry has been established as the dominating tracking method of choice for the time-related tracking of transformation. Modern dilatometers are able to indicate that the detectable changes in length amount to approx. 1% of the transformed structural quantity. Other measuring methods have also been used in the past, for instance, many of the isothermal TTT diagrams still available today have been prepared with the aid of thin plate samples immersed into molten salt. After a multi-stage holding time, these samples were quenched in salt water and during the subsequent determination of structural constitution the martensite was evaluated as not yet transformed austenite at the time of quenching.



**Bild 2:** Umwandlungsmengen-Zeit-Diagramm isothermischer Umwandlungen

**Fig. 2:** Amount of transform microstructure at isothermal transformation

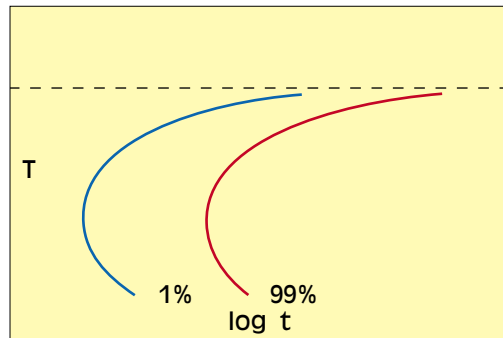


**Bild 3:** Doppelt logarithmische Auftragung aus Bild 2

**Fig. 3:** As Fig. 2 with logarithmic scales

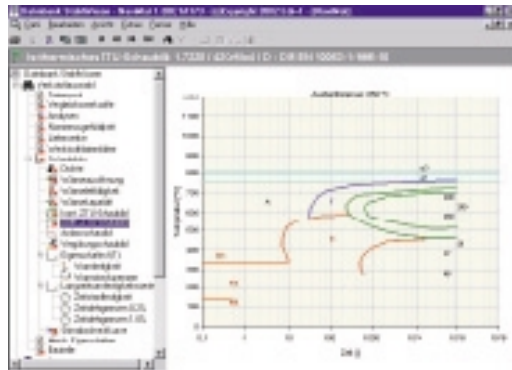
**Bild 4a:**  
Umwandlungsbeginn  
und -ende  
isothermischer  
Umwandlungen

**Fig. 4a:**  
Start and finish  
of isothermal  
transformation



**Bild 4b:** Vollständiges  
isothermisches ZTU-  
Schaubild des Stahls  
42CrMo4 (aus Stahl-  
Wissen NaviMat)

**Fig. 4b:**  
Complete isothermal  
transformation  
diagram of steel  
42CrMo4 (taken from  
SteelMaster  
Database)



besonders bei hochkohlenstoffhaltigen Stählen deutlich, da die Umwandlungswärme besonders groß ist.

### Kontinuierliche ZTU-Schaubilder

Unter dem Sammelbegriff kontinuierliche ZTU-Schaubilder fasst man zunächst alle die zusammen, bei denen die Temperaturänderung mit der Zeit kontinuierlich stattfindet. Die einfachere Handhabung und bessere Vergleichbarkeit mit praktischen Wärmebehandlungen hat dazu geführt, zunächst die Abkühlung der Proben in unterschiedlichen Medien, z.B. Ofen, Luft, bewegte Luft, Öl oder Wasser vorzunehmen. Ähnlich wie bei der Aufstellung von isothermischen ZTU-Schaubildern mit Hilfe von Abschreckbädern kann man unter diesen Versuchsbedingungen aber auf eine Wiedererwärmung im Umwandlungsbereich keinen Einfluss nehmen. Deshalb und aus Gründen der Vergleichbarkeit hat sich in der jüngeren Vergangenheit die Praxis durchgesetzt, mit geregelten Abkühlungen und konstanter Abkühlungsgeschwindigkeit zu arbeiten. Eine genauere Analyse der Temperatur-Zeit-Kurven bei geregelter Abkühlung zeigt allerdings, dass oftmals die eingesetzten technischen Mittel nicht ausreichen, die konstante Abkühlungsgeschwindigkeit vor allem auch im Umwandlungsbereich einzuhalten.

Aufgrund dieser dargelegten Unterschiede in der Abkühlung können sich bei der Gegenüberstellung von älteren bzw. jüngeren kont. ZTU-Schaubildern erhebliche Unterschiede ergeben. So liegt die Temperatur des Endes der Perlitumwandlung im Falle der geregelten Temperaturführung meist wesentlich niedriger. Dies ist eine Folge der unterdrückten Rekaleszens. Im Extremfall kann bei freier Abkühlung die Endtemperatur über der Anfangstemperatur liegen, Bild 5.

A common element of all measuring methods is the determination of the temporal structure formation in structural volume-time diagrams, Fig. 2 and 3. From these curves, 1% of the transformed volume is defined as start of transformation and 99% as end of transformation. This creates the typical transformation curves in the isothermal TTT diagrams, Fig. 4.

The reproducibility of such volume-time curve depends to a large extent on various factors listed as follows:

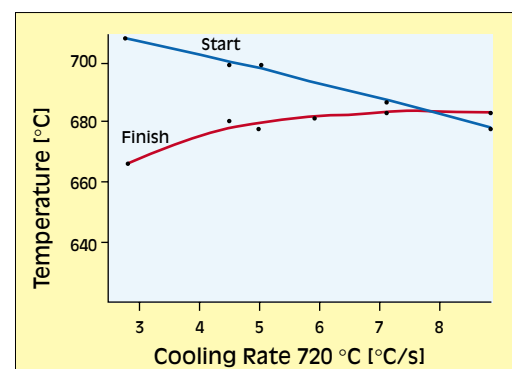
- the achievable quenching speed to the respective holding temperature
- uniform cooling of the test sample
- compliance with isothermal temperature control
- sensitivity of direct or indirect volume measurement
- compliance with a defined austenization condition

In addition, the actual chemical composition of all alloying elements must be taken into consideration for transferability to steels of the same designation. In a strict sense, a TTT diagram always applies only for the underlying basic experimental conditions.

A noticeable falsification of volume curves is also created, if it is not possible to suppress the transformation-related reheating (recalescence) during the transformation. Heating of test samples is particularly evident in case of steels with a high carbon content, since the transformation heat is particularly high.

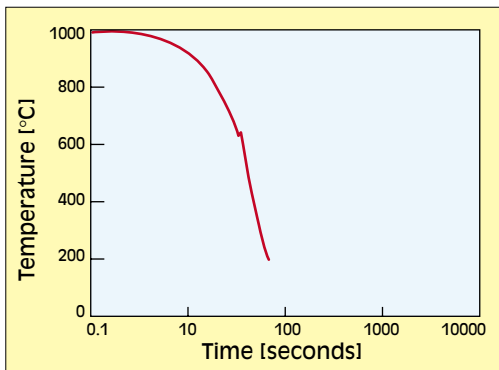
### Continuous TTT Diagrams

Under the collective term "Continuous TTT Diagrams" we initially group all those in which the temperature change takes place continually with time. Simpler handling and better comparability with practical heat treatment methods have resulted in the practice of initially cooling the test samples in various media, e.g. furnaces, air, oil or water. However, similar to the creation of isothermal TTT diagrams with the aid of quenching baths, under these



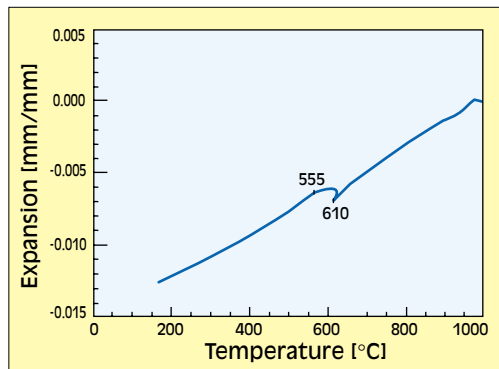
**Bild 5:** Verschiebung der Umwandlungstemperaturen mit steigender Abkühlungs-Geschwindigkeit bei freier Abkühlung

**Fig. 5:** Effect of initial cooling rate on transformation temperature



**Bild 6a: Temperatur-Zeit-Kurve für eine kontinuierliche Umwandlung**

**Fig 6a: Temperature-Time-Curve of an continuous transformation**



**Bild 6b: Längenänderungs-Temperatur-Kurve für einen niedrig legierten Stahl**

**Fig 6b: Expansion-Temperature-Curve of low alloyed steel**

Das Umwandlungsverhalten der Stähle wird über Längenänderungs-Temperatur-Kurven und Temperatur-Zeit-Kurven in Abschreckdilatometern bestimmt, Bild 6a und 6b. Die unterschiedlichen Abkühlungsgeschwindigkeiten werden heute üblicherweise durch ein Kühlgas eingestellt. Zur Bestimmung der Umwandlungspunkte wird ein Tangentenverfahren angewandt, das im Stahl-Eisen-Prüfblatt 1680 beschrieben ist.

Auf der gemessenen Temperatur-Zeit-Kurve werden die so ermittelten Umwandlungspunkte markiert und gleichartige Gefügeumwandlungen werden zu Umwandlungsbereichen zusammengefasst, Bild 7. Dies ermöglicht eine Interpolation der Ergebnisse zwischen zwei benachbarten Abkühlungskurven mit ausreichender Genauigkeit.

Zusätzlich zu den Umwandlungsfeldern werden die Ergebnisse der metallographischen Untersuchung (Gefügeart und Menge) und der Härtemessung eingetragen.

Die Reproduzierbarkeit und Übertragbarkeit von Umwandlungsvorgängen auf andere Schmelzchargen gleicher Stahlqualität ist auch hier an sehr enge Grenzen gebunden und kann bei Nichtbeachtung zu erheblichen Unterschieden führen.

test conditions one has no control over the reheating in the transformation area. Therefore, as well as for reasons of comparability, the practice of working with controlled cooling and constant cooling speeds has been established as the method of choice in the recent past. However, a more accurate analysis of temperature-time-curves at controlled cooling shows that often the utilized technical resources were insufficient to maintain a constant cooling speed, above all in the transformation area.

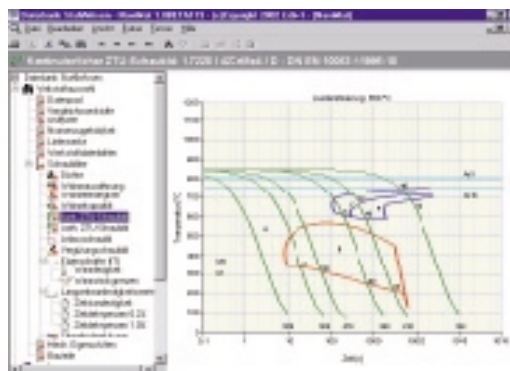
Due to these described differences in cooling, considerable differences may result in a comparison of older vs. more recent continuous TTT diagrams. For instance, the temperature of the end of perlite transformation in most cases is significantly lower with controlled temperature. This is a consequence of suppressed recalescence. In extreme cases, at free cooling the end temperature may be higher than the start temperature, Fig. 5.

The transformation behavior of steels is determined by means of length change-temperature curves and temperature-time curves in quenching dilatometers, Fig. 6a and 6b. Nowadays the different cooling speeds are usually obtained by means of a cooling gas. A tangent process is used for the determination of the transformation points, which is described in the Steel-Iron Test Instruction 1680.

The transformation points determined in this way are marked on the measured temperature-time curve and similar structure transformations are grouped in transformation areas, Fig. 7. This enables the interpolation of results between two adjacent cooling curves with sufficient accuracy.

In addition to the transformation areas, the results of the metallographic studies (type of structure and volume), as well as the hardness measurement, are recorded.

Here too, the reproducibility and transferability of transformation processes to other melting batches of equivalent steel quality charges is subject to tight limitations and in case of non-observation may lead to significant differences.



**Bild 7: Vollständiges kontinuierliche ZTU-Schaubild für den Stahl 42CrMo4 (aus Stahlwissen NaviMat)**

**Fig 7: Complete continuous cooling transformation diagram for steel 42CrMo4 (taken from SteelMaster Database)**

**INFO: 209**