

Forschung, Wissenschaft

Herstellungsmöglichkeiten metallischer Werkstoffe (besonders der Stähle) mit sehr engen Eigenschaften-Toleranzen

B. Marincek *

Institut für Metallurgie der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich

Abstract

A first part of this paper deals with recent tendencies in the development and production of metallic materials, especially of steels. In connection with the discussion of subsequent steps in the production, which ultimately lead to the as-cast or end-structure it is demonstrated, using some steels as examples, that with high-quality metallic materials the mere chemical composition as it is used today in most cases will not give sufficient information. As a result it becomes evident, that the main aim in the production of metallic materials consists in the reproducible attainment of a necessary structure with the resulting properties within narrow limits. Therefore subsequently all production steps are discussed with regard to structure control of melting, solidification, heat treatment and deformation.

As a consequence of the above-mentioned it is necessary, that a desired structure can be exactly characterized in a quantitative way, this aim being helped by the application of structure-related standards of metallic materials.

Einleitung

Bekanntlich wird die Herstellung metallischer Werkstoffe (z.B. Stähle) immer problemreicher, weil die Anforderungen an deren Qualität immer höher werden. Es werden nicht nur Stähle mit höheren Eigenschaftswerten erzeugt (quantitative Qualität), sondern auch mit kleineren Eigenschaften-Streuungen, inkl. Anisotropie (qualitative Qualität) verlangt [1]. Eine der Folgen dieser Entwicklung sind die Klagen der Verbraucher, dass sie von den Herstellern in vielen Fällen die gewünschte Qualität, vor allem was die Gleichmässigkeit der Eigenschaften betrifft, nicht bekommen. Wie kann aber dieses Dilemma beseitigt werden?

Im Folgenden wird versucht, auf die Ursachen zu stossen und diejenigen Möglichkeiten aufzuzeigen, die die heutige Situation verbessern könnten.

Heutige Entwicklungstendenzen

Auf dem Gebiete der Entwicklung metallischer Werkstoffe zeichnen sich verschiedene Entwicklungstendenzen ab, und zwar

- an metallische Werkstoffe, z. B. Stähle, werden immer höhere Anforderungen in quantitativer Hinsicht, d. h. zahlenmässig höhere Eigenschaften (quantitative Qualität), angestrebt und erreicht; gleichzeitig wird aber Wert auch auf

- gleichmässigeren Eigenschaften, d. h. mit geringeren Streuungen (Eigenschaftentoleranzen, qualitative Qualität) gelegt. Weiterhin erfolgt immer mehr und mehr
- die Ausrichtung auf Gebrauchseigenschaften, mit denen der Verarbeiter direkt arbeiten kann; so wird nicht δ_B , sondern $\delta_{0,2}$, weiterhin Bruchzähigkeit, Bearbeitbarkeit, Hochtemperatur-Dauerstandfestigkeit, Ermüdung, Wechselfestigkeit usw. gefördert;
- eine Abnahme der Zahl der Sorten, z. B. der Stähle; dabei sollen mit gleichen Stahlorten grössere Bereiche befriedigt werden, was zusätzliche Anwendungsschwierigkeiten bringen kann. Nicht zuletzt können
- ungenügende Werkstoffnormen erwähnt werden; die heutigen Normen sind aufgebaut auf den minimalen Eigenschaften ohne Toleranzangabe (meistens sind diese nicht direkt anwendbar, wie δ_B), und auf der chemischen Analyse der Legierung, die, wie wir später sehen werden, keine Garantie für enge Toleranzen der Eigenschaften bringt.

Der Verbraucher spürt diese Lage. Er hilft sich z. B. dadurch, dass er sehr grosse Stahlchargen bestellt (z. B. 100 t) in der Annahme, dass damit die Garantie des einheitlichen Materials gegeben ist. Die Frage ist, ob er auf diese Art wirklich einheitliches Material bekommt. Der weitere Ausweg der Verbraucher besteht in der Auswahl der Chargen mit optimalen Eigenschaften beim Hersteller. So ein Vorgehen ist allgemein undurchführbar und auch unwirtschaftlich, und vor allem von der Kontrolle (z. B. der Probenahme) abhängig, die z. B. die Gleichmässigkeit sichern sollte.

Keines dieser Vorgehen garantiert die Gleichmässigkeit der Lieferung, d. h. die Abweichungen der Eigenschaften in gewünschten Grenzen.

Heutige Art der Herstellung der Metallegierungen (z. B. der Stähle)

Die wichtigsten Teilschritte auf dem Wege der Herstellung der Metallegierungen sind aus Abb. 1 ersichtlich. Durch die Rohstoffwahl hat der Metallurge die Möglichkeit, die geeigneten Ausgangsmaterialien für seine Legierung zu wählen. Die so ausgesuchten Rohstoffe werden dann verflüssigt (erschmolzen), wor-

* Prof. Dr. Borut Marincek, Institut für Metallurgie der Eidgenössischen Technischen Hochschule, CH-8092 Zürich

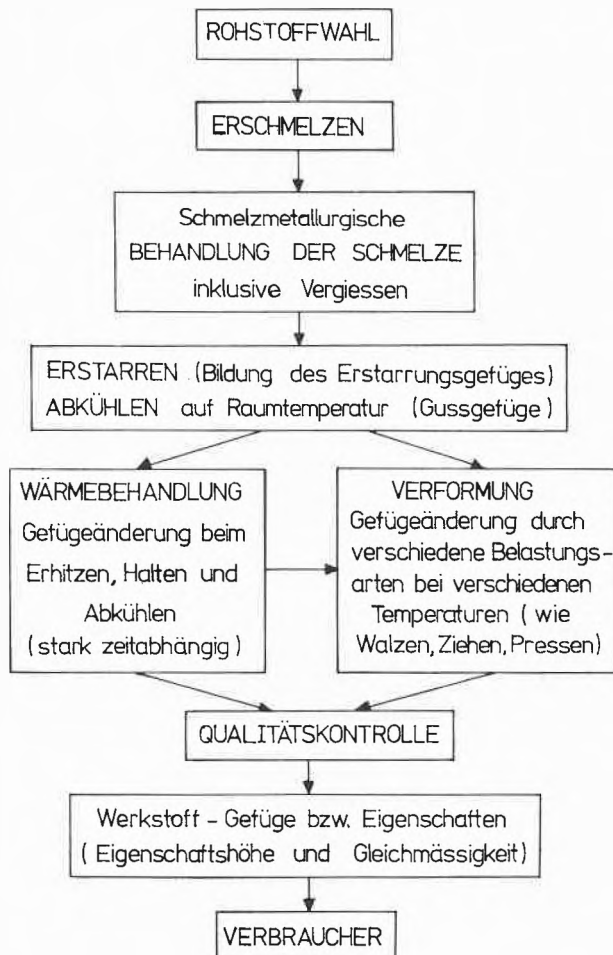


Abb. 1: Wichtigste eigenschaftsbestimmende Teilschritte der Herstellung metallischer Werkstoffe, z. B. Stähle.

auf die schmelzmetallurgische Behandlung der Schmelze (z. B. Legieren, Entgasen, Desoxydieren, Entschwefeln, Temperatureinstellung, Homogenisieren bezüglich der Analyse und der Temperatur, Ausscheidung der Desoxydationsprodukte usw.) erfolgt. Bei Schmelzen wird vor allem versucht, die Zusammensetzung der Schmelze im vorgeschriebenen Rahmen zu halten und die Charge bei der vorgeschriebenen Temperatur zu vergiessen. In der Giessform (z. B. in der Kokille) erfolgt die Erstarrung, einer der wichtigsten Schritte zur Herstellung metallischer Werkstoffe mit gewünschten Eigenschaften. Beim Erstarren bildet sich das sogenannte Erstarrungsgefüge, das entweder als Endprodukt zur Anwendung kommt (z. B. als Gussstücke in der Giesserei), oder aber erst durch Verformen (wie Walzen, Schmieden, Ziehen, Pressen usw.) oder durch die Wärmebehandlung (Erhitzen, Halten und Abkühlen oder Abschrecken) auf die gewünschte Form und Eigenschaften gebracht wird. Die Qualitätskontrolle auf dem ganzen Wege soll dazu führen, dass als Resultat Legierungen mit gewünschten Eigenschaften mit gewünschten Toleranzen vorliegen, die einem bestimmten Gefüge entsprechen.

Folgerungen für die Gleichmässigkeit des Gefüges bzw. der Eigenschaften der Legierungen

Aus dem Besprochenen geht hervor, dass die Erstarrung die Schlüsselstellung bei der Herstellung der Legierungen innehat. Deshalb ist es wichtig zu wissen, welche Faktoren für das Erstarrungsgefüge bzw. für die damit zusammenhängenden Eigenschaften von Bedeutung sind. Die erstarrungsgefügebeeinflussenden Faktoren sind aus Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1: Erstarrungsgefügebestimmende Faktoren

1. *Chemische Analyse* inkl. die der Spurenelemente, die in sehr kleinen Mengen, in der Regel in einer Menge von weniger als 1000 ppm vorkommen, wie O, N, H, Pb, Sn, Cr, Sb, As usw.
2. *Erstarrungsgeschwindigkeit* (je höher diese ist, um so feinkörniger ist das Gefüge und um so geringer sind die Seigerungen).
3. *Keimzustand der Schmelze* und die während der Erstarrung an der Erstarrungsfront sich bildenden Keime.
4. *Stofftransport beim Erstarren*, besonders an der Erstarrungsfront, womit die Morphologie des Gefüges, Keimbildung, Gefügefehler usw. beeinflusst werden, wie Stengelkristalle, Globulite, sowie
5. *Gussgefügefehler* (Mikro- und Makrofehler), wie Hohlräume (Risse, Gasblasen-Lunkeln), Kristall- und Blockseigerung, nichtmetallische Einschlüsse inkl. grobe Schlackenteile, Oberflächenfehler, Gefügespannungen usw.

Aber auch durch die Wärmebehandlung und/oder Verformung kann das Gefüge metallischer Werkstoffe nachträglich beeinflusst werden, wobei auch eine bessere Gleichmässigkeit erzielt werden kann. Die beeinflussenden Faktoren für diese Vorgänge sind abhängig von der [6]

- Zahl der aktiven Reaktionsstellen (Keime),
- Konzentration der Reaktionsteilnehmer, wie der Atome, Versetzungen usw. und
- Beweglichkeit, die vor allem durch die Kristallstörungen gegeben ist.

Durch diese Vorgänge wird das Gefüge metallischer Werkstoffe bestimmt, wovon deren Eigenschaften abhängig sind.

Damit man aber zu metallischen Werkstoffen mit gewünschtem Gefüge bzw. mit gewünschten Eigenschaften kommt, muss sinnvolle Qualitätskontrolle bei diesen Vorgängen eingesetzt werden, und es muss bekannt sein, welches optimale Gefüge für die Erzielung der gewünschten Eigenschaften anzustreben ist (d. h. Beziehungen zwischen dem Gefüge und den Eigenschaften).

Heute ist die Qualitätskontrolle vor allem auf die Zusammensetzung der Werkstoffe ausgerichtet; die Zusammensetzung allein kann jedoch nicht die geforderten engen Toleranzen sichern, weil das Gefüge und somit die Eigenschaften, wie bereits oben erwähnt, nicht nur von der Zusammensetzung abhängig sind. Bei der Erstarrung, d. h. bei der Gefügebildung während der Erstarrung sind auch wichtig Spurenelemente,

Keimgehalt, Erstarrungsgeschwindigkeit und Erstarrungsgefügefehler, bei der Wärmebehandlung und Verformung das Vorhandensein der Keime, der Versetzungen usw., der Beweglichkeit der Atome, d.h. alles Faktoren, die nicht oder zuwenig durch chemische Zusammensetzung erfasst werden.

Eine Qualitätskontrolle dagegen, die auf das Gefüge nach der Erstarrung, nach der Wärmebehandlung und nach der Verformung ausgerichtet ist, sichert sehr enge Toleranzen und somit ist sie besonders geeignet zur Herstellung der metallischen Werkstoffe mit Eigenschaften, die eine engere Streuung aufweisen.

Einige Beispiele, die zeigen, dass Gefüge und Eigenschaften nicht nur von der chemischen Zusammensetzung abhängig sind

Um das in der Praxis erzeugte Erstarrungsgefüge zu verstehen, muss man sich vergegenwärtigen, wie heute die Erstarrung z.B. bei den Walzlegierungen vor sich geht; eine schematische Darstellung zeigt Abb.2, wo verschiedene Erstarrungsarten zusammengestellt sind, und zwar die Erstarrung in den Kokillen zu Block, dann beim Strangguss und beim ESU-Verfahren*.

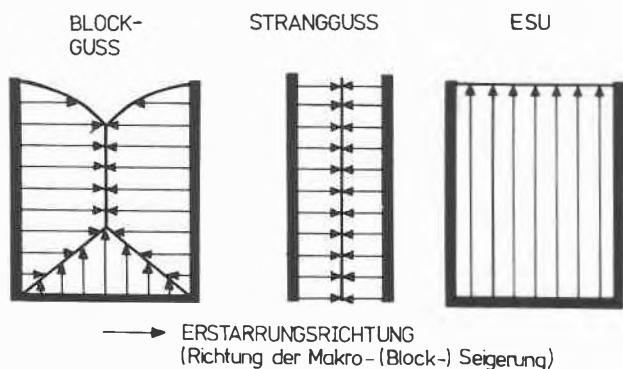


Abb.2: Verschiedene Erstarrungsarten.

Während die Erstarrung beim Block- und Strangguss von aussen zur Mitte erfolgt, wobei es zu Anreicherungen in der Mitte des Blockes (infolge Block-Seigerung) kommt, verläuft die Erstarrung bei ESU von unten nach oben (sogenannte gerichtete Erstarrung), wodurch die Blockseigerung weitgehend ausgeschaltet wird. Hiernach ist der Unterschied zwischen dem Block- und Strangguss-Gefüge verhältnismässig gering, denn in beiden Fällen erfolgt die Erstarrung etwa auf die gleiche Art, dagegen sehr gross gegenüber ESU-Block. Diese Unterschiede sind aus Abb.3 ersichtlich, aus dem hervorgeht, dass bei ESU vor allem die Zähigkeit

* *ESU-Verfahren:* Elektroschlacken-Umschmelz-Verfahren, nachdem ein Ausgangs-Stahlblock (als eine Elektrode angeschlossen) in flüssiger Schlacke (Schlackentemperatur ca. 1800°C) zu einem neuen Stahlblock in einer wassergekühlten Kupferkokille (als 2. Stromanschluss) umgeschmolzen und zur Erstarrung gebracht wird. Dieses Verfahren liefert z. Zt. Stähle mit bester Eigenschaften-Isotropie (Abb. 2 rechts und Abb. 3).

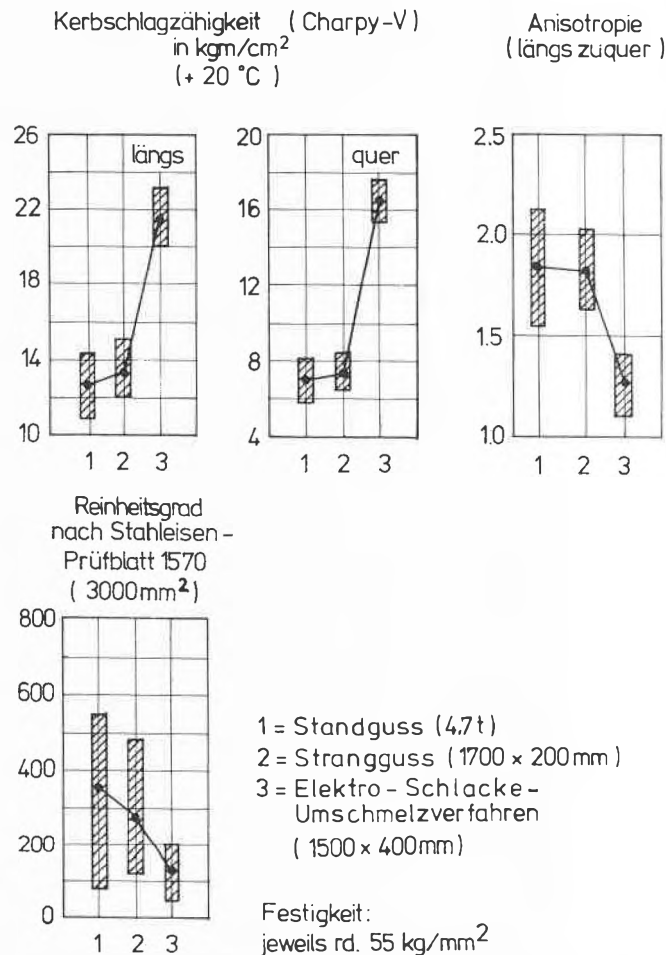


Abb.3: Einfluss des Giessverfahrens auf Reinheit und Kerbschlagzähigkeit (St 52-3).

und die Isotropie gegenüber Block- und Strangguss sehr günstig sind. Auch die Desoxydation der Schmelze, die durch die Zusammensetzung nicht erfasst wird, kann die Eigenschaften wesentlich ändern, wie die Abb.4 zeigt.

In Abb.5 sind ZTU-Diagramme* zweier Stähle dargestellt; die Zusammensetzung der Stähle liegt innerhalb der Normen; die Zusammensetzung des einen Stahles liegt an der oberen und des anderen an der unteren Grenze der Norm. Ein sehr unterschiedliches Verhalten bei der Wärmebehandlung ist die Folge, wobei z.B. der Umwandlungsbeginn der Zwischenstufe bei einem um 3 Sek. und beim zweiten bei etwa 40 Sek. liegt. Daraus ist ersichtlich, dass die Einhaltung der Normzusammensetzung noch keine Garantie für enge Eigenschaftstoleranzen mit sich bringt.

Wie die Härtebarkeit der Stähle gleicher Zusammensetzung vom Gefüge abhängig ist, zeigt Abb.6, wo

* *ZTU-Diagramm:* Zeit - Temperatur - Umwandlungs - Diagramm, in dem die Gefügeumwandlungen in Abhängigkeit der Zeit dargestellt sind (Beispiel: Abb.6a und b).

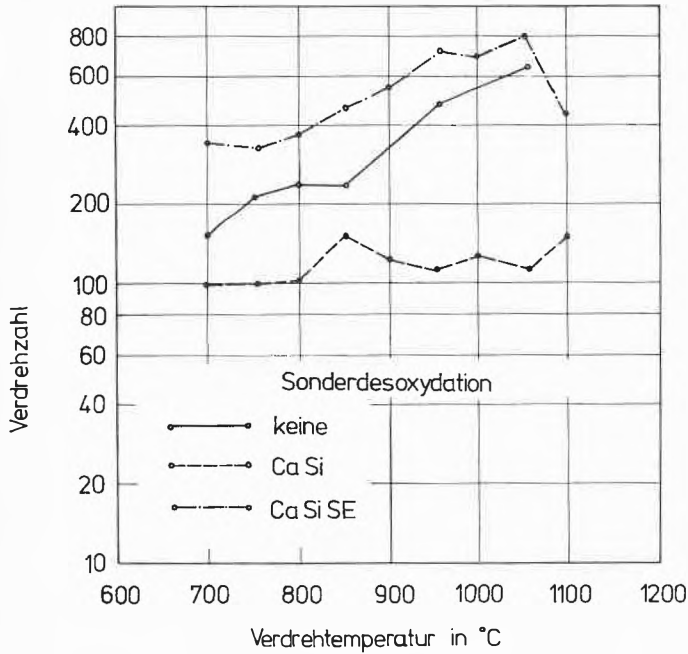


Abb. 4: Formänderungsvermögen des Stahles X10CrAl24 in Abhängigkeit von verschiedenen Desoxydationsmassnahmen (Warmtorsionsversuch) [3].

oben die Jomini-Kurven* des gleichen Stahles, jedoch einmal in homogenisierter, dann mit maximaler und zuletzt mit minimaler Seigerung dargestellt sind. Das entsprechende Gefügeprofil zeigen die Teilbilder unten, woraus hervorgeht, dass Matensitgefüge eine Breite von über 100 mm bei Proben mit maximaler Seigerung, bis 40 mm bei homogenisierten Proben und bis 20 mm bei der Probe mit minimaler Seigerung aufweist (alle Stähle besitzen praktisch die gleiche Zusammensetzung).

Eine sehr hohe Isotropie (Gefüge-Gleichmässigkeit) kann neuerdings aber auch ohne ESU erzielt werden (Abb. 7); die Werte links wurden dadurch erreicht, dass die Stahlschmelze nach besonderen Verfahren schmelzmetallurgisch behandelt wurde (Einblasen von CaSi oder Mg in die Stahlschmelze). So eine Schmelzbehandlung gewährleistet nicht nur hohe Gleichmässigkeit der Schnürung, sondern auch hohe Einschnürung selbst und hohe Zähigkeit.

Alle diese Bilder zeigen, dass die Eigenschaften der Stähle wesentlich auch von anderen Faktoren, und nicht nur von der chemischen Analyse abhängig sind. Eine genaue Einhaltung der chemischen Analyse genügt also nicht, um metallische Werkstoffe mit engen Toleranzen zu erzeugen. Die Gleichmässigkeit kann nur durch das entsprechende Gefüge dieser Legierungen, das bei allen Stufen der Herstellung angestrebt werden soll, erreicht werden.

* Jomini-Kurve: Beim Stirn-Abschreckversuch – eine Probe zur Erfassung der Stahlhärtbarkeit – erhaltene Kurven (Beispiel: Abb. 6c).

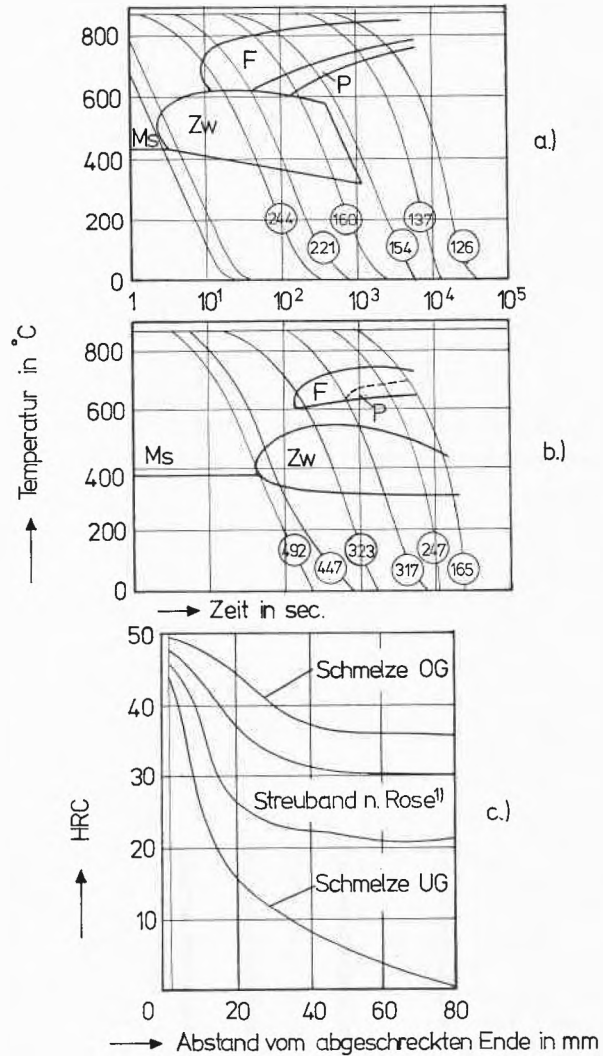


Abb. 5: ZTU-Schaubild für kontinuierliche Abkühlung von Stahl 25CrMo4 bei unterschiedlicher Zusammensetzung; (a) Schmelze UG (untere Grenze der Normzusammensetzung), (b) Schmelze OG (obere Grenze der Normzusammensetzung); Härteverlauf nach Stirnabschreckversuch (c) [4].

Optimierungsmöglichkeiten der metallischen Werkstoffe durch Gefüge als Ziel- und Kontrollgrösse anstelle der chemischen Zusammensetzung

Wie gezeigt, soll die Herstellung metallischer Werkstoffe so erfolgen, dass nach der Erstarrung, sowie nach der Verformung und Wärmebehandlung das den gewünschten Eigenschaften entsprechende Gefüge hergestellt wird; es soll gefügebezogene und nicht zusammensetzungbezogene Herstellung betrieben werden.

Um das zu verwirklichen, ist es nötig folgendes anzustreben:

1. Die Betrachtung der Herstellung soll global erfolgen, d.h. die Gefüge- bzw. Zusammensetzungskontrolle soll nicht nur auf die letzten Schritte begrenzt bleiben, sondern sie soll sich auf alle gefügebestimmenden Teilschritte ausdehnen, d.h. auf die Gefügekon-

trolle bei der Erstarrung, bei der Verformung und bei der Wärmebehandlung.

2. Die Kontrolle soll sich nicht auf die Zusammensetzung (auch nicht auf die Normzusammensetzung)

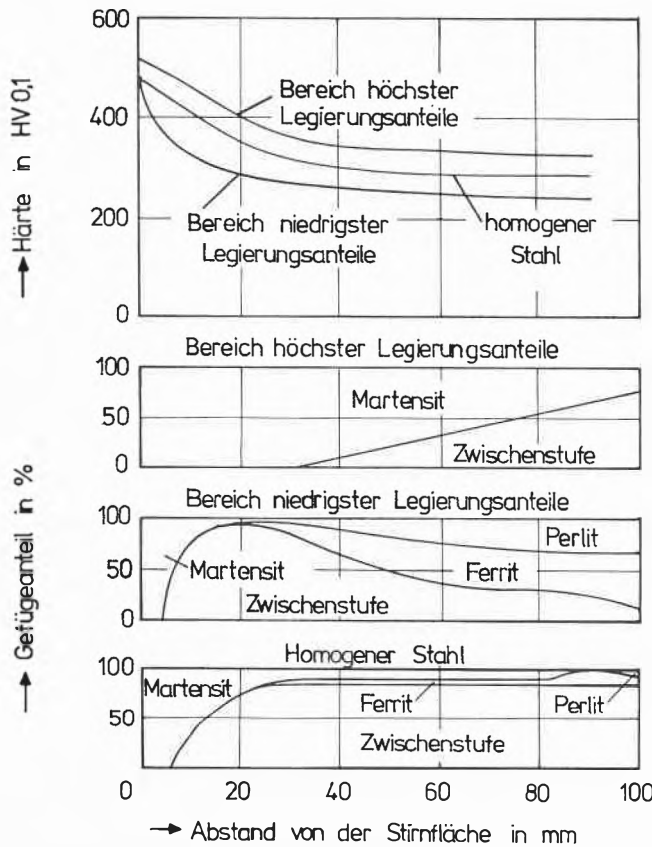


Abb. 6: Härteverlauf und Gefügemengen-Kurven von Stirnabschreckproben des Stahles 25CrMo4 in seigerungsbehafteten und im seigerungsfreien Zustand [4].

ausrichten, sondern auf Gefüge und auf die damit verbundenen Gebrauchseigenschaften, was ein auf Gefüge ausgerichtetes Denken bzw. Betrachten und eine auf das Gefüge ausgerichtete Qualitätskontrolle notwendig macht.

- Die meistens verbreitete Meinung, dass Gussgefüge für die Endigenschaften der Stähle nicht entscheidend ist, d. h., dass man aus dem der vorgeschriebenen Zusammensetzung entsprechenden Gussgefüge durch die Wärmebehandlung und Verformung immer die gewünschten Eigenschaften erreichen kann, muss revidiert werden und zwar um so eher, je höher die qualitative und die quantitative Qualität der metallischen Werkstoffe sein soll.
- Auch die Auffassung, dass die heutigen Normen für die Gleichmässigkeit der Legierungen genügen, muss aufgegeben werden, weil die heutigen Normen z. B. nur minimale Eigenschaften vorschreiben und dabei keine Toleranz nach oben angeben und weil sie vielmals auf die chemische Zusammensetzung (z. B. der Stähle) ausgerichtet sind.

Normen dagegen, die metallische Werkstoffe mit engen Toleranzen sichern, sollen sich gründen auf

- die Gebrauchseigenschaften (mit Toleranzen) und
- das vorgeschriebene Gefüge (mit Toleranzen).

Wie kann aber ein solches Vorgehen konkret realisiert werden? Folgendes müsste in Angriff genommen werden:

- Die Feststellung der Verbraucher-Bedürfnisse in Zusammenhang mit Gefüge und Gebrauchseigenschaften inkl. Toleranzen, die zeigen sollen, was anzustreben ist.

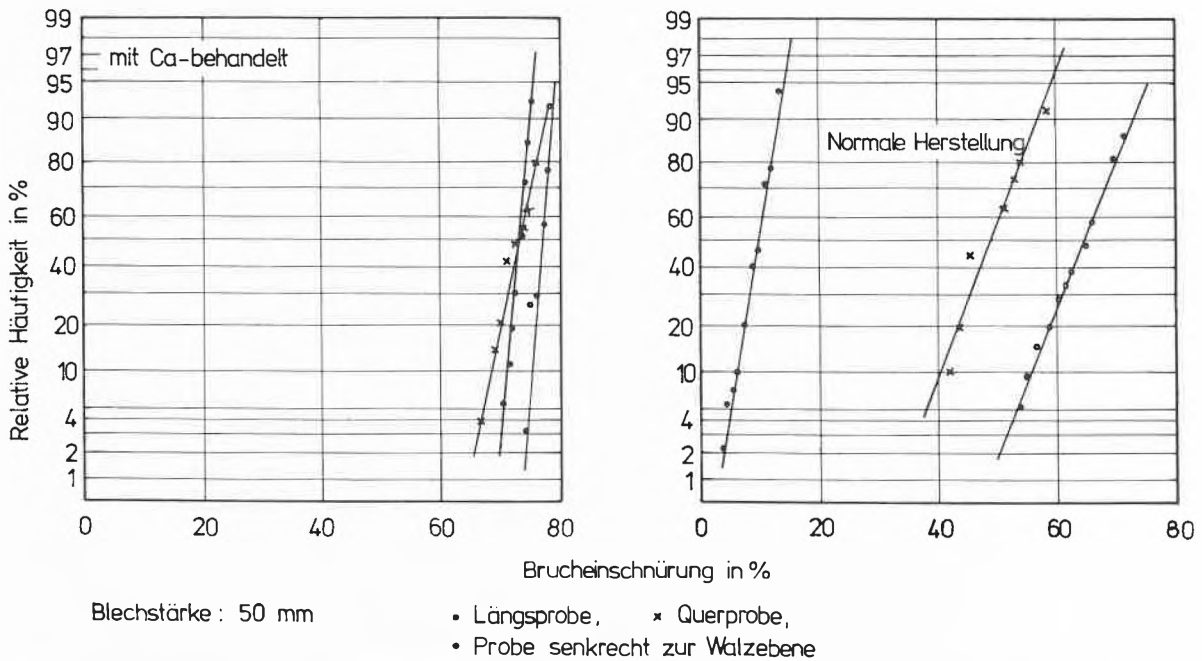


Abb. 7: Stahl FG 36 (ASTM-A 516 Gr 70) Verformbarkeit in den verschiedenen Richtungen von Walzblechen [5].

2. Die Aufstellung bzw. Ausarbeitung der Gefüge-Gebrauchseigenschaften-Beziehungen (inkl. Streuungen), die zeigen sollen, wie das optimale Gefüge aussieht. Diese Arbeiten sollen durch Entwicklungs- und Forschungsförderung auf diesem Gebiete beschleunigt werden.
3. Eine gefügebezogene Kontrolle ist beim Schmelzen, bei der Wärmebehandlung und bei der Verformung einzuführen. Dabei sollen vorhandene Verfahren verbessert, evtl. erweitert und auch neue Wege beschritten werden.
4. Die Zusammenarbeit zwischen Verbrauchern und Herstellern soll gefördert werden, um für beide Seiten eine sinnvolle und wirtschaftliche Lösung anzustreben, wobei am Anfang nicht zuviel Gewicht auf zu strenge Vorschriften gelegt werden soll. Das soll mit der Zeit erfolgen und erst dann, wenn die Bedürfnisse das unbedingt erfordern.
5. Neue, auf Gefüge und Gebrauchseigenschaften (inkl. Toleranzen) beruhende Werkstoffnormen anstreben.

Folgerungen

Diese Ausführungen haben nicht nur zahlreiche Anregungen gegeben, sondern sicher auch viele Zweifel, vor allem bei den Herstellern, aufgerührt. Es soll aber betont werden, dass die hier gebrachten Möglichkeiten

grundsätzlich nichts Neues darstellen, d.h. sie werden schon an verschiedenen Stellen in Angriff genommen oder bereits angewendet. Für den Fortschritt ist es wichtig, die Fragen so zu stellen, wie sie gewöhnlich nicht gestellt werden, um dadurch auf neue Möglichkeiten aufmerksam zu werden. Dabei muss man allerdings versuchen, sich von der üblichen Denkweise möglichst zu befreien (z. B. von den heute gültigen Normen) und neue Wege beschreiten, was hier unter der Devise: Gefügebeziehung und nicht Zusammensetzungbeziehung versucht wurde, auch auf die Gefahr hin, dass der neue Weg neue Probleme bringt. Wenn aber die Beschäftigung mit diesen neuen Problemen weiterführt, d.h. zur Herstellung besserer metallischer Werkstoffe beiträgt, dann ist so ein Weg sicher als lohnend zu bezeichnen. Über die Richtigkeit so eines Vorgehens kann jedoch nur die Verwirklichung in der Praxis und somit die Zukunft Bescheid geben.

Literatur

- 1 B. Marincek: *Elektrowärme internat.* 31 (1973) B 236–239.
- 2 M. Wahlster: *Technica* 21 (1972) 847–51.
- 3 D. Hengerer, C. Kubisch und W. Holzgruber: *Berg- und Hüttenm. Mh.* 116 (1971) 417/425.
- 4 H. Straube, A. Kulmbrug und A. Schindler: *Technica* 22 (1973) 1627.
- 5 E. Spetzler und J. Wendorff: *Radex-Rundschau* (1976) 595.
- 6 W. Pitch: *Stahl Eisen* 96 (1976) 557–567.