

## QUALITÄT DURCH UMFORMUNG

Received - Primljeno: 2003-12-04

Accepted - Prihvaćeno: 2004-04-15

Review Paper - Pregledni rad

Die Qualitätsverbesserung bei gleichzeitiger Reduzierung der Herstellungskosten und Senkung des Fertigungsaufwandes sind nachhaltig vorgetragene Forderungen. Die Notwendigkeit der Produktionsumstellung auf eine prozessstufenarme Fertigung bei Beachtung sozialökologischer Aspekte wird immer eindringlicher nachgewiesen und verlangt. Viele Forschungsarbeiten zur Entwicklung von Werkstoffen und Werkstofftechnologien sind auf diese Zielstellungen ausgerichtet worden. Sie haben zur Verfahrensrationalisierung und Gütesteigerung beigetragen. Die erreichten Technologiefortschritte zur Herstellung von warmgewalzten Stabstählen und Drähten waren ausschlaggebend, dass deren Produktqualität und Gebrauchswert in bemerkenswerter Weise gesteigert werden konnten. Das hat sich in den nachfolgenden Industriezweigen in vielfältiger und sichtbarer Art günstig ausgewirkt. Sie sind dies Basis, noch höhere Qualitätsniveaus anzuvisieren.

**Schlüsselworte:** *umformung, warmgewalzten stabstählen, warmgewalzten drähten, qualität*

**Quality by deformation.** The improvement of quality and coincident reducing of production costs, as well as the lowering of fabrication costs are the requirements that are made ever and ever again. A necessity of shifting the manufacture to a fabrication with a continuous processing, whereby social-ecological aspects are taken into account, increasingly recognized and required. The objective of many researching works is directed to the development of material and development of materials technology. These researches have attributed to the experience rationalisation and improvement of quality. The achieved technological improvements in the production of hot-rolled steel stabs and wires were crucial for a significant improvement of products quality and use value. That reflected in a multiply beneficial and noticeable way on the later emerged industrial branches. They are the basis for seeking higher quality levels.

**Key words:** *deformation, hot-rolled steel stabs, hot-rolled steel wires, quality*

**Kvalitet putem deformacije.** Poboljšanje kvalitete i istovremeno smanjivanje troškova proizvodnje i izrade su zahtjevi koji se stalno postavljaju. Nužnost preusmjeravanja proizvodnje na izradu bez stupnjevanih postupaka, pri čemu se vodi računa o socijalno-ekološkim aspektima, dokazuje se sve više i više, a ujedno se i sve više zahtijeva. Cilj mnogih istraživanja usmjeren je prema razvoju materijala i razvoju tehnologije materijala. Takva istraživanja su doprinijela racionaliziranju iskustva i poboljšanju kvalitete. Postignuti tehnološki napreci u proizvodnji toplo valjanih čeličnih šipki i žica bili su odlučujući za značajno povećavanje kvalitete proizvoda i uporabne vrijednosti. To se odrazilo na višestruko povoljan i vidljiv način na kasnije nastale industrijske grane. Oni su osnova sa koje se može stremiti prema višim razinama kvalitete.

**Ključne riječi:** *deformiranje, toplo valjane čelične šipke, toplo valjane čelične žice, kvaliteta*

### EINLEITUNG

Das Spannungsfeld, in dem die metallurgischen Betriebe - und nicht nur diese - produzieren und auch künftig arbeiten müssen, zwingt zu einer permanenten, durchgreifenden

---

R. Kawalla, W. Lehnert, TU Bergakademie Freiberg, Deutschland

Verfahrensrationalisierung und Qualitätsverbesserung. Beide Faktoren schließen sich nicht aus, sondern stehen im engen Zusammenhang. Sie bedingen sich gegenseitig. Sobald durch einen Technologiefortschritt ein neues Qualitätsniveau erreicht wird, kann und muss nach weiteren technologischen Verbesserungen zur verbesserten Wertschöpfung gesucht werden und umgekehrt. Dieser Entwicklungsprozess darf

nicht abbrechen. Nur so kann die Produktion auf hohem technischem Stand gesichert und wettbewerbsfähig vorgenommen werden. Es bedeutet dies, die Technologien sowohl kosteneffizienter als auch werkstoffgerechter zu gestalten. Gleichzeitig muss das Produktionssortiment einerseits auf die Produktpalette eingeschränkt und ausgerichtet werden, für die die technischen Voraussetzungen in besonderem Maße günstig sind und für die ein hohes betriebliches Know-how vorliegt. Andererseits muss es durch neue Produkte erweitert werden, um den wachsenden Ansprüchen der Kunden zu genügen. Auf keinen Fall dürfen die stahlerzeugenden und stahlverarbeitenden Betriebe wichtige Werkstoff- und Verfahrensentwicklungen versäumen, denn dies würde bedeuten, den langfristigen Unternehmenserfolg auf das Spiel zu setzen. Sämtliche Umformverfahren, besonders aber die Walzverfahren, sind geeignet, die Qualität und den Gebrauchswert der Produkte zielgerichtet zu beeinflussen. Durch wissenschaftsbasierte Technologien können Finalerzeugnisse in hoher und höchster Güte mit großer Zuverlässigkeit hergestellt werden. Diesbezügliche wissenschaftliche Erkenntnisse und praktische Erfahrungen haben im Laufe der Zeit zu einer Umstrukturierung und inhaltlichen Umorientierung der Umformtechnik geführt. Der gegenwärtige Stand rechtfertigt zu der Annahme, dass das Innovationspotential noch nicht ausgeschöpft ist und noch viele Ansatzpunkte zur Erweiterung des Sortiments an Qualitätsprodukten bestehen. Speziell durch eine wissenschaftliche Durchdringung der Umformprozesse in Form von fundierten Analysen über den Werkstofffluss, die Gefüge- und Strukturbildungsvorgänge sowie zu den Änderungen in der Oberflächenfeingestalt und zum Werkstoffverhalten der Stähle bei der Umformung können Rückschlüsse und Voraussagen über die Qualitätsmerkmale der Produkte gezogen werden. Die Qualität der erzeugten Produkte kann im Vorfeld ihrer Herstellung durch eine Art Preprozessing definiert und bewertet werden. In Verbindung mit mathematischen Simulationen wird sie im hohen Maße planbar. Es lassen sich dadurch mehr oder weniger verbindliche Entscheidungen über Produktverbesserungen bzw. Produktneuheiten treffen.

In den hier vorgestellten Ausführungen wird auf die Möglichkeiten und den Stand der Qualitätsbeeinflussung beim Warmwalzen von Stabstahl und Drähten eingegangen. Die Einschränkung wird vorgenommen, weil das Walzen in Streckkalibern ein wirtschaftlich starker Produktionssektor eines jeden Landes ist. Außerdem ist es den Umformverfahren zuzuordnen, denen wegen der begrenzten Regelbarkeit der technologischen Parameter allgemein nur eine relativ geringe Qualitätsfähigkeit zugesprochen wird.

### QUALITÄTSMERKMALE

Generell leiten sich die an einen warmgewalzten Draht oder Stabstahl gestellten Qualitätsmerkmale sowohl aus dem vorgesehenen Einsatz- und Verwendungszweck als

auch aus der Art seiner Weiterverarbeitung ab. Erstere sind in der Regel durch spezielle thermische, chemisch-physikalische und mechanische Beanspruchungen statischer oder dynamischer Art ausgewiesen. Sie lassen sich schon deshalb nicht durch eine einzige Kenngröße charakterisieren. Die ausgewählten Stähle müssen dementsprechend immer ganz bestimmte Eigenschaftskombinationen aufweisen. Je mehr das hergestellte Produkt in seinem Verhalten den jeweiligen Beanspruchungsbedingungen gerecht wird, umso höher ist sein Gebrauchswert, seine Qualität. In Bild 1. sind technische Kriterien dargestellt, die einer Qualitätsbewertung zugrunde gelegt werden



Bild 1. Kriterien der Qualitätsbeurteilung und -bewertung  
Slika 1. Kriteriji utvrdivanja i vrednovanja kvalitete

können und müssen. In der Mehrzahl sind sie direkt von den Umformbedingungen abhängig und mithin durch diese beeinflussbar. Durch die chemische Zusammensetzung, den Reinheitsgrad, die Erschmelzungs- und Gießart wird das Eigenschaftspotential der Werkstoffe zwar vorgeprägt, jedoch kann es über die Beeinflussung der Realstruktur und des Gefügebauens in unterschiedlicher Weise zur Geltung gebracht werden. Diesbezüglich kommt der Umformung neben der Wärmebehandlung eine entscheidende Rolle zu.

Bei der Warmumformung finden markante thermisch aktivierbare Gefüge- und Strukturveränderungen statt. Die dabei eintretende Umformverfestigung kann mit der Kornfeinung, Ausscheidungs- und Phasenhärtung gekoppelt und überlagert werden. Die Konzepte der Thermomechanischen Behandlung (TMB) beruhen auf dieser Möglichkeit

und machen sich diesen Effekt zu Eigen. Bei den beiden klassischen Arten der TMB, der normalisierenden bzw. temperaturkontrollierten Umformung und der TMB mit thermomechanischen Umformung, wird auf die Herausbildung eines feinkörnigen, gleichmäßigen und homogenen Gefüges im  $\gamma$ -Mischkristallgebiet orientiert und durch eine werkstoffangepasste Prozessführung gefördert. Es werden auf diese Weise günstige Bedingungen und Voraussetzungen für die Umwandlung des Austenits zu einem feinen bis feinsten Sekundärgefüge mit exzellenten Eigenschaften geschaffen. Insofern ist bei der Herstellung von Qualitätsstählen die Steuerung der Endwalztemperatur und der Abkühlungsgeschwindigkeit im Gebiet der Phasenumwandlung von großer Wichtigkeit. Bei Stahlmarken aller für das Walzen von Stabstahl und Draht relevanten Stahlgruppen wurden durch Technologien dieser Art bemerkenswerte Eigenschaftsverbesserungen erzielt und das Qualitätsniveau auf eine unverkennbar höhere Stufe gestellt. Die später angeführten Werkstoffbeispiele, die sich auf Spitzenprodukte beziehen, werden dies verdeutlichen.

Jedoch hängt der Gebrauchswert der gewalzten Drähte und Stäbe nicht nur von den meist statisch ermittelten Eigenschaftswerten ab. Er wird vielmehr darüber hinaus von der Oberflächenbeschaffenheit (Rauhigkeit, Verzunderung, Rissempfindlichkeit etc.) sowie von der Form- und Maßgenauigkeit bestimmt. Beide Eigenschaften erlangen einen umso größeren Stellenwert, je mehr zur prozessstufenarmen Produktion übergegangen wird.

Oft genug sind ungünstige Oberflächentopographien Ursache für arbeitsaufwendige Nachbearbeitungen. Oberflächenfehler in Form von Kerben, Narben, Mikrorissen und dgl. sind Orte für Spannungsspitzen, Rissbildungen und Ausgangspunkte eines frühzeitigen Werkstoffversagens. Abweichungen in der Form- und Maßgenauigkeit machen bei vielen Einsatzgebieten nachträgliche zusätzliche Kaltumformungen notwendig, die immer mit kostspieligen Oberflächenentzunderungen verbunden sind.

### QUALITÄTSZIELE

Das Anforderungsprofil an die Qualität der Walzprodukt hat sich parallel zum industriellen Fortschritt geändert und es wird sich auch in Zukunft wandeln. Moderne Prozessketten zur Herstellung von Stabstahl und Draht mit den 4 Basistechnologien:

- sekundärmetallurgischen Behandlungsverfahren,
- Mikrolegierungstechnik
- Strangguss
- Thermomechanisches Walzen.

Bieten die Gewähr, Produkte zuverlässig in hoher Qualität zu produzieren. Sie erweisen sich in ihrer gegenwärtigen Konfiguration konkurrenzlos. Durch die Anwendung der automatisierten Prozesssteuerung in Verbindung

mit einem leistungsstarken Qualitätsüberwachungssystem können die qualitätsbestimmenden Sollwerte mit hoher Treffsicherheit und geringer Fehlerquote erreicht werden. Für die Zukunft kann eine weitere Verschärfung dieser Maßstäbe an die Produktqualität prognostiziert werden. Bei weiterer Optimierung der Technologiekonzepte in den 4 Prozessstufen und gegenseitiger Abstimmung sollten Qualitätsverbesserungen bei gleichzeitiger Kosten- und Materialeinsparung realistisch sein.

Ziel ist in erster Linie:

- die Gleichmäßigkeit der Produktqualität durch Einengung der Schwankungsbreite der jeweils ausschlaggebenden Kennwerte zu steigern, d. h. schmalere Häufigkeitsverteilungen zu gewährleisten und natürlich in besonderen Fällen,
- die Sollwerte, besonders die der schlechtesten Eigenschaften, auf ein höheres Niveau zu verschieben.

### LAYOUT MODERNER DRAHT- UND STABSTAHLWALZWERKE

Nach statistischen Erhebungen sind seit 1991 weltweit etwa 180 Draht- und Stabwalzwerke neu gebaut und in Betrieb genommen worden. Zahlenmäßig sind dies mehr Anlagen als in den anderen Walzstahlproduktbereichen (Bild 2.), obwohl in der Produktion eine Verschiebung zu Flachprodukten stattgefunden hat und der Anteil an feinem Stabstahl und Draht an der Gesamtwalzstahlerzeugung mit ca. 23 % unverändert geblieben ist [3]. Das relativ hohe Investitionsgeschehen, dem nur eine mittlere Zuwachsrate der Jahresproduktion, 1,3 Mio t/a gegenübersteht, übertrifft dennoch aus 2 Gründen nicht.

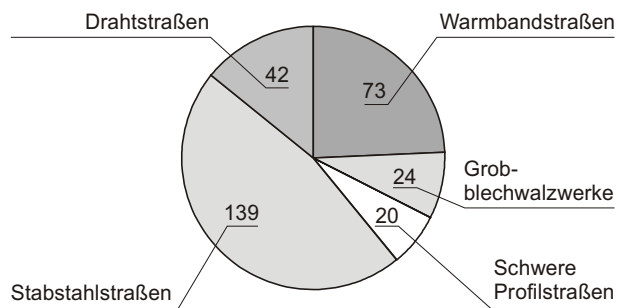


Bild 2. Walzwerksanlagenbau seit 1991 [2]  
Slika 2. Gradnja valjaonica nakon 1991. [2]

Einerseits mussten und wurden in den Entwicklungsländern überproportional viele Anlagen errichtet, um dort die Versorgung des Bauwesens und der Metallverarbeitungsbetriebe beim Aufbau einer eigenständigen Industrie sicherzustellen. Andererseits machten es die qualitativen und quantitativen Verschiebungen im Produktionsortimente und natürlich die starken technischen Umwälzungen erforderlich, die Walztechniken und Walztechnologien auf ein höheres Niveau zu stellen. Stabstahl- und Drahtwalz-

werke der neusten Generation sind meist für ein eingegrenzt Produktionssortiment, eine hohe Produktionskapazität, eine flexible Betriebsweise und einen computer-gestützten automatisierten Prozess- und Qualitätssteuerung ausgelegt. Technische Details und Merkmale wurden u. a. in [3] und in neueren Werksbeschreibungen [4 - 6] ausführlich dargelegt, weswegen an dieser Stelle nicht besonders darauf eingegangen werden soll. Die technische Neuausrichtung und Umstrukturierung findet zwangsläufig in veränderten Anlagenlayouts ihren Ausdruck.

In Bild 3. ist beispielsweise ein kombiniertes Stabstahl- und Drahtwalzwerk zum Walzen von Edelstählen dargestellt, das, obwohl es schon 1995 in Betrieb genommen

### VERSUCHSANLAGEN ZUR EXPERIMENTELLEN SIMULATION

Das Institut für Metallformung hat die technische Entwicklung des Warmwalzens von Profilen, Stäben und Drähten in Kalibern seit vielen Jahrzehnten forschungsseitig in voller Breite und angemessener Tiefe begleitet, unterstützt, aktiviert und gefördert. Durch die systematische wissenschaftliche Durchdringung und experimentellen Untersuchungen, die mit dem Aufbau und den Betrieb eines 4 - gerüstigen Konti - Versuchswalzwerkes vor ca. 20 Jahren auf eine sehr fortschrittliche Stufe gestellt wurden, konnte ein breites Spektrum wissenschaftlich - technischer

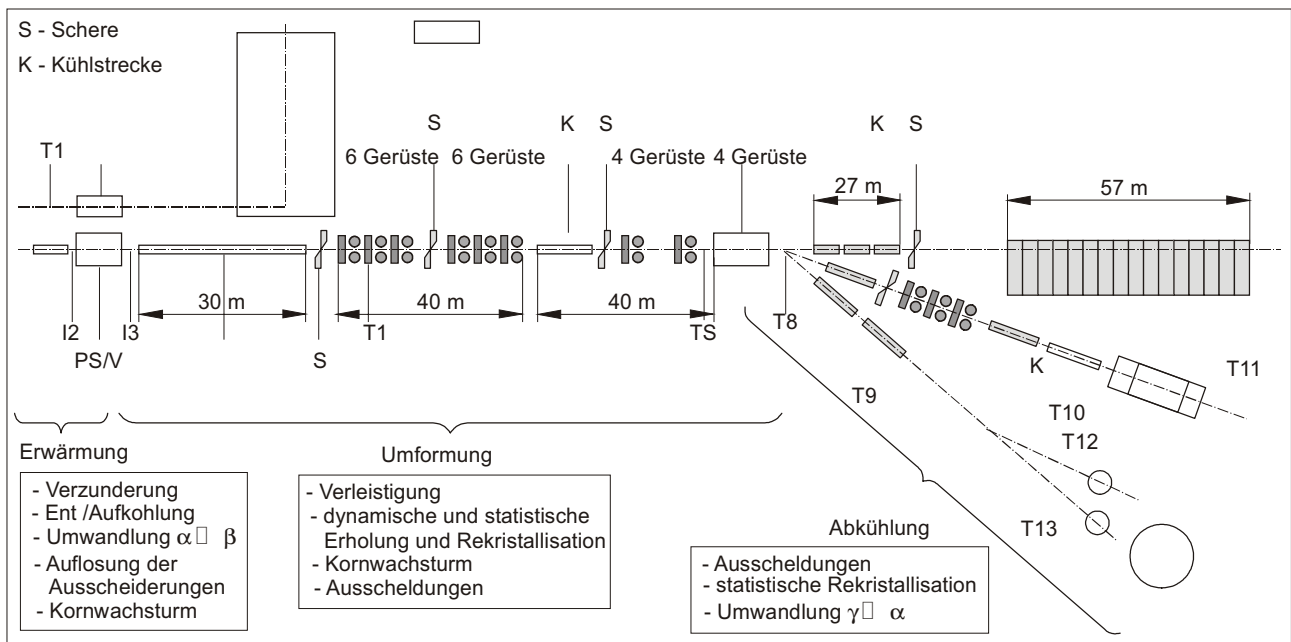


Bild 3. Layout einer kombinierten Stabstahl- und Drahtstraße [9]  
Slika 3. Shema kombinirane pruge za valjanje čeličnih šipki i žice [9]

wurde, alle wesentlichen Elemente zur Walzung von Erzeugnissen hoher Produktqualität enthält. Besondere Merkmale sind:

- die Ausrüstung mit einem Hubbalkenofen zur zunder- und entkohlungsarmen Erwärmung,
- der Einbau einer Presswasserentzunderungsanlage zur Primärzunderentfernung,
- die Bestückung mit Kühlstrecken zur feinfühligsten Temperaturführung im Sinne einer thermomechanischen Behandlung und nicht zuletzt,
- die Einordnung eines Streck- und Maßwalzblockes zum Präzisions- und Free - Size - Walzen.

Diese Ausrüstungselemente sind in dieser oder anderer Form ebenso zu wichtigen Bausteinen für das abmessungs-, werkstoff- und qualitätsgerechte Feinstahl-/Drahtwalzen bei allen üblichen Edelbaustählen geworden.

Fragestellungen bearbeitet und einer Lösung näher gebracht werden. Diese bezogen sich sowohl auf die Walz-, Maschinen-, Anlagen- und Verfahrenstechnik als auch auf die Prozessautomatisierung und nicht zuletzt auf die Werkstofftechnik. Auf allen Teilgebieten konnten neue Einblicke, Erkenntnisse und Grundlagen bis hin zu geschlossenen mathematischen Simulationsprogrammen geschaffen werden. Die Ergebnisse haben in vielfältiger Form Eingang in die Ingenieurpraxis gefunden und anerkanntermaßen viele technisch - technologische Neuerungen ausgelöst. Um für die Übernahme zukunftsorientierter Grundlagen- und angewandter Forschung gerüstet zu sein, wurde das Versuchswalzwerk rekonstruiert, modernisiert und auch für das Walzen von Bändern ausgerichtet. Der Umbau ist 2003 abgeschlossen worden. Bild 4. zeigt die aktuelle Anlagenkonfiguration für die Stab-/Drahtwalzung. Der 4 - gerüstigen Kontiwalzstrecke in HV- Anordnung ist ein

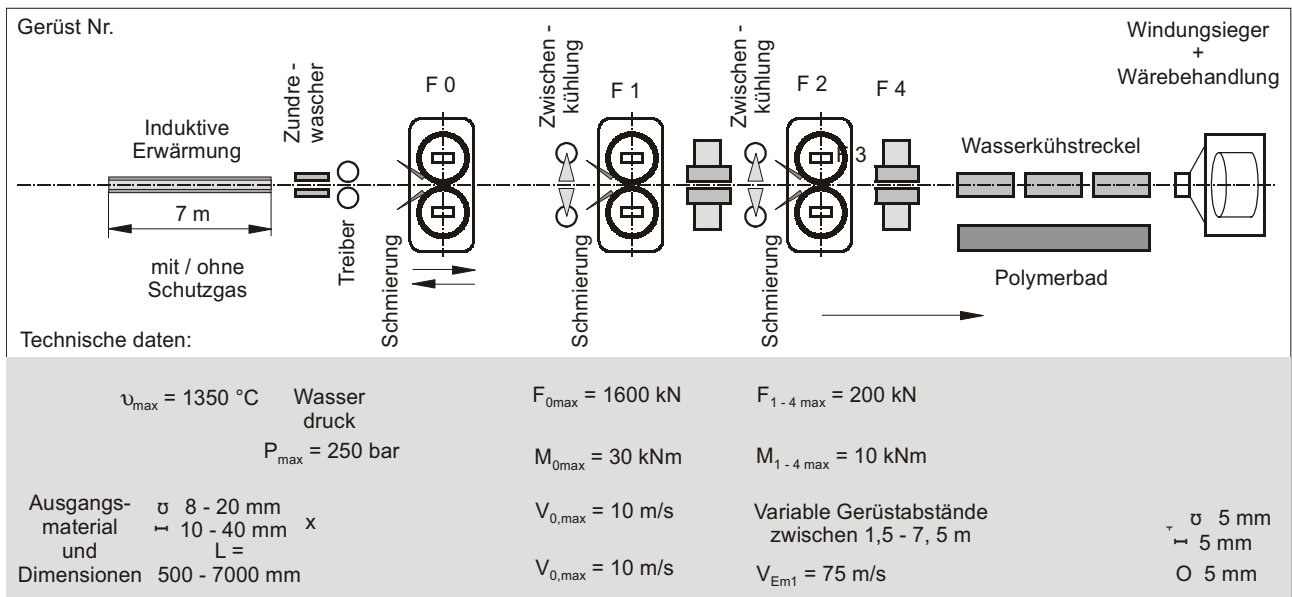


Bild 4. Konti-Versuchsanlage zur Stab- und Drahtwalzung bei Geschwindigkeiten bis 75 m/s  
Slika 4. Probno postrojenje za valjanje šipki i žice brzinama do 75 m/s

Duo-Reversiergerüst vorgeschaltet worden, so dass der walzbare Abmessungsbereich gespreizt wurde. Die Anlage ist mit neuen Messgeräten bestückt und mit computergestützten Messwerterfassungs- und Auswertesystemen versehen. Durch den Einzelantrieb der Walzeinheiten kann die Walzgeschwindigkeit stufenlos geregelt. Zusätzlich kann die Pausenzeit zwischen den Stichen durch Verschiebung der Gerüste variiert werden, so dass verschiedene Temperatur - Zeitzyklen bei der Umformung realisierbar werden. Für die Temperatursteuerung bei der Abkühlung stehen wahlweise verschiedene Abkühleinrichtungen zur

Verfügung. In jeder Phase und an jeder Stelle der Anlage können Proben zur speziellen Werkstoffprüfung entnommen werden. Durch die exakte Erfassung der Orts- und Zeitabhängigkeit der Gefüge- und Eigenschaftsentwicklung sowie der Änderungen in geometrischen Gestalt können die Auswirkungen veränderter Walzparameter auf die Qualitätsmerkmale für ein weitgespanntes technologisches Fenster verfolgt und nachgewiesen werden.

Um auch differenzierte Aussagen über die Eigenschaften und die Haftung des Zunders treffen zu können, wurde ein externer Versuchsstand aufgebaut. Bild 5. verde-

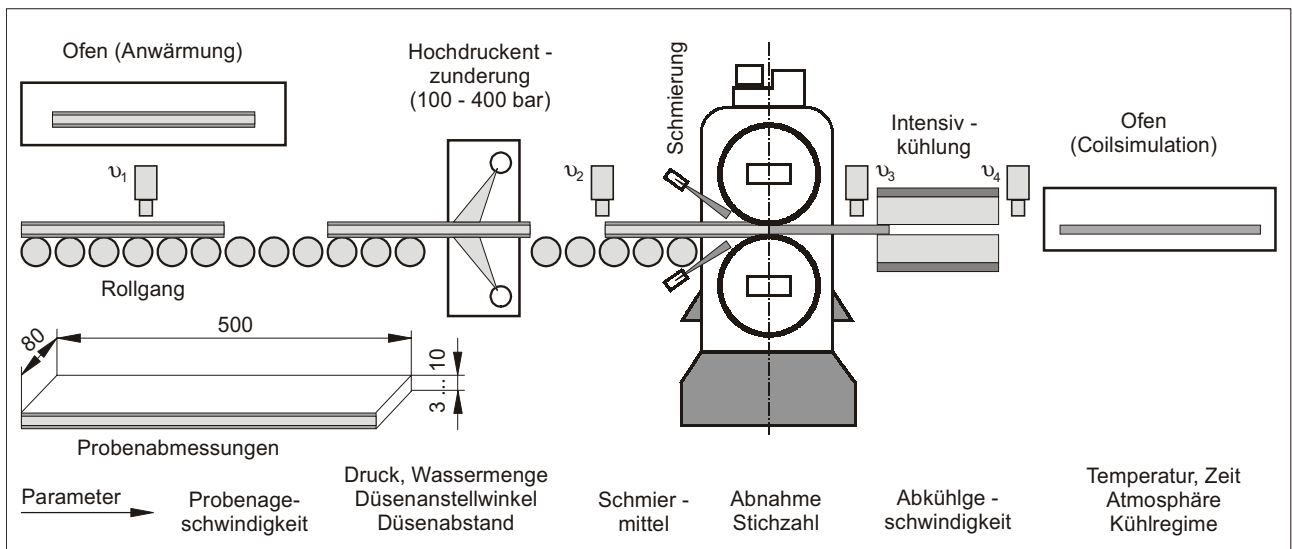


Bild 5. Prüfstand zur Hochdruckwasserentzunderung Walzen von 15 mm  $\varnothing$  aus  
Slika 5. Ispitna klupa za proveravanje vodom visokotlačnog uređaja za skidanje odgoraka sa  $\varnothing$  15 mm



utlicht in schematischer Darstellung die Anlage. In erster Linie sollen mit dieser Einrichtung die Möglichkeiten der Einflussnahme auf den Vorgang der Sekundär- und evt. Tertiärzunderbildung und der Verbesserung der Oberflächentopographie ergründet werden.

**QUALITÄTSVERBESSERUNG DURCH MAßGENAUES WALZEN**

Bei modernen Draht- und Stabstahlwalzwerken widerspiegeln die im Fertigstaffelbereich angeordneten Maßwalzleinheiten bzw. Kombinierten mehrgerüstigen Streck- und Maßwalzblöcke (RSB) - Bild 3. - den technischen Fortschritt. Für diese ist eine kompakte, gedrungene, dehnungsarme Bauweise mit teilweise hydraulisch anstellbaren Walzscheiben charakteristisch. Wegen der hohen Steifigkeit der Gerüste und durch die Umformung mit geringen Einzelabnahmen ( $\epsilon_A = 4 \dots 16 \%$ ) kann eine hohe Maßgenauigkeit erreicht werden (Bild 6.). Gleichzeitig die Free - Size - Walzung möglich.

Walzbedingungen	Kalibrierung	Maschinenteknik
Einlaufquerschnitt	Kaliberreihenart	Federkonstante
Temperatur	Einzelabnahme	Zahl der Walzeinheiten
Längszug	Gesamtanahme	Walzsystem
Kaliberfüllung	Breitungsbehinderung	Walzenlagerung

Bild 6. Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit des Walzgutes beim Walzen in Walzblöcken  
 Slika 6. Čimbenici koji utječu na mjerljivost proizvoda valjanih u valjačkim stanovima

Beides, die höhere Maß- und Formgenauigkeit und die engere Durchmesserabstufung, tragen zu einer Rationalisierung der Weiterverarbeitung bei. Die sonst notwendige Kaltumformung kann entweder ganz entfallen oder zumindest reduziert werden. Das schlägt sich in einer Erhöhung des Materialausbringens und Senkung der Produktionskosten nieder. Namentlich für die Produktsegmente Kaltstachstähle, Blankstähle, Federstähle, Automatenstähle und Wälzlagerstähle ist dies von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Zum Einsatz gelangten Walzsysteme, bei denen das Kaliber von zwei, drei bzw. vier Walzen gebildet und auf diese Weise die Breitung im Bereich der Kaliberöffnung unterschiedlich stark behindert wird. Bei Rundabmessungen von 4, 5 bis 40 mm  $\varnothing$  konnten im gesamten in Frage kommenden Temperaturbereich die Maßtoleranzen auf kleiner als  $1/4 \dots 1/6$  DIN bzw.  $1/2$  ASTM verringert werden [3 - 7]. Noch engere Toleranzen werden angestrebt. Eine direkte Nachbildung der Umformverhältnisse auf dem Versuchswalzwerk ist wegen der Unterschiede in den Walzsystemen nicht möglich. Wohl aber können durch experimentelle und numerische Simulation vertiefte Einblicke in den Umformvorgang gewonnen werden. Diese kombinierte Vorgehensweise ist besonders günstig und hat sich

vielfach bewährt. Sie ermöglicht einerseits einen größeren Freiheitsgrad bei der praktischen Versuchsdurchführung. Vor allem aber können andererseits die Berechnungsannahmen sowohl bezüglich der thermophysikalischen Werkstoffkennwerte als auch hinsichtlich der Rand- und Anfangsbedingungen unmittelbar überprüft, angepasst und verifiziert werden. Bei den numerischen Berechnungen haben sich die Finite - Elemente - Methode (FEM) und die Finite - Differenzen - Methode (FDM) als durchaus gleichwertig erwiesen, sofern bei letzterer die Bestimmung der plastomechanischen und umformtechnischen Kenngrößen ( $\epsilon_{xyz}, \dot{\epsilon}_{xyz}, \vartheta_{xyz}, \sigma_F, K_W, F, W, P \dots$ ) auf der Grundlage der Schrankentheorie und der elementaren Plastizitätstheorie vorgenommen wird. Für beide Methoden wurden Bechnungsprogrammpakete entwickelt, mit denen das Walzen in Kalibern geplant, vorausberechnet, analysiert und optimiert werden kann.

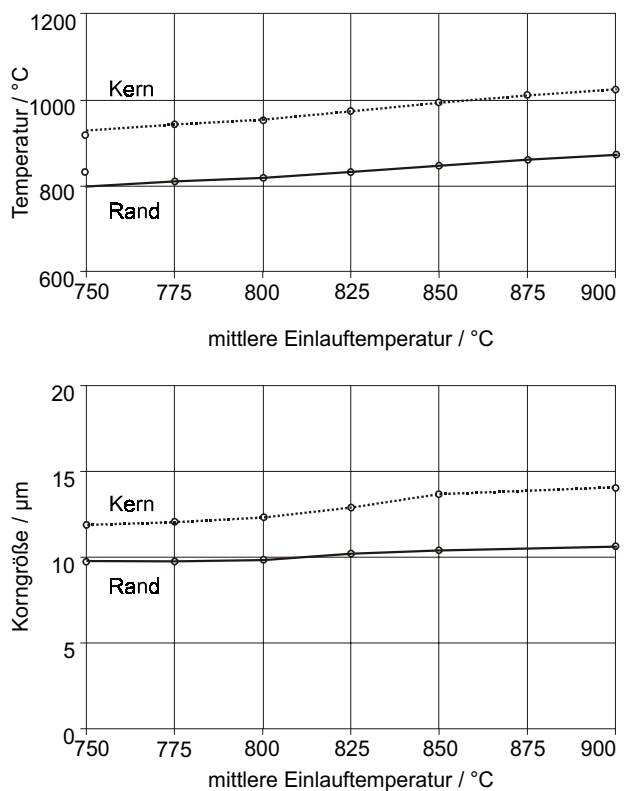


Bild 7. Temperatur- und Korngrößenentwicklung beim Walzen von 15 mm  $\varnothing$  aus Stahl 42CrMo4 im 4-gerüstigen Maßwalzblock  
 Slika 7. Temperature i veličine zrna pri valjanju čelika 42CrMo4 sa  $\varnothing 15$  mm u valjačkom stanu s četiri valjka

Beim Präzisions- und Free - Size - Walzen ist der Werkstofffluss bedingt durch die relativ sehr geringen Streckgrade bei allen Walzsystemen sehr inhomogen. Die Umformung findet in der Hauptsache in den oberflächennahen Zonen statt. Dies hat jedoch keine gravierenden Auswirkungen auf das Gefüge der Stähle. Im Gegenteil, die Mikrogefüge

erfüllen, wie die experimentell- numerische Analyse für das Walzen von 30 mm  $\varnothing$  mit  $v_{\text{End}} = 15$  m/s nach Bild 7. belegt, für die nachfolgende Phasenumwandlung beste Voraussetzungen. Bei dem in Betracht gezogenen Temperaturbereich verläuft zwar die Rekristallisation besonders im Rand unvollständig ab, jedoch überträgt sich die verbliebene Umformverfestigung auf die nächsten Stiche. Das hat zur Folge, dass selbst bei ungünstigsten thermischen Bedingungen der Randbereich zu mehr als 43 % und der Kernbereich zu über 92 % rekristallisiert. Die Feinkörnigkeit des Gefüges bleibt erhalten. Struktur- und Gefügeanalysen haben diesen Befund mehrfach erhärtet.

**QUALITÄTSERHÖHUNG DURCH WIRKSAMERE ENTZUNDERUNG**

Die Verzunderung der Stähle durch Oxidation lässt sich bei Temperaturen über 500 °C nicht ausschließen, weil das Sauerstoffpotential der Luft beim Walzen und erst recht im Rauchgas bei der Erwärmung in brennstoffbeheizten Öfen größer als das der Oxide ist. Sie ist zudem immer mit einer Entkohlung verbunden, die besonders bei höhergekohlten Stählen in den Vordergrund tritt. Die beim Warmwalzen erzielbare Oberflächenqualität wird durch das Ausmaß dieser Stofftransportvorgänge wesentlich bestimmt und zum Teil erheblich beeinträchtigt. Art, Ausbildung, Auflage, Dicke und Haftfestigkeit des Zunders sind kennzeichnende Bewertungskriterien. In Bild 8. sind die Bildungsbedingungen und technischen Beeinflussungs-

Zunder	
Primärzunder	Sekundärzunder
Atmosphäre	Rauchgas ( $O_2, CO_2, H_2O$ ) / ( $CO, H_2$ ) Luft
Temperatur	$\frac{\Delta m}{A_0} \sim \exp(-\frac{Q}{R \cdot T})$
Zeit	$\frac{\Delta m}{A_0} \sim \sqrt{t}$ $\frac{\Delta m}{A_0} \sim k_1 \cdot t + k_2 \sqrt{t}$
Menge / %	0,5 ... 0,8      0,1 ... 0,2
Dicke / $\mu m$	300 ... 600      2 ... 40
Aufbau / %	FeO 60 ... 95      FeO > 96 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 4 ... 40      Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> < 5 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1 ... 3
Wirkung von Legierungs-, Begleit- und Spurenelementen	
Wachstumshemmung Al, Cr, Cu (bei $v < 1084$ °C), Mo Si (bei $v < 1173$ °C), Nb, Ti, P, As, Sb	
Haftfestigkeitserhöhung Cu, Ni, Sn, Si	
Haftfestigkeitserniedrigung Al, C, Mn, P, s, As, Sb	

Bild 8. **Bildung und Eigenschaften von Zunder bei Edelmetallen**  
Slika 8. **Stvaranje odgoraka na plemenitim građevnim čelicima i njegove karakteristike**

möglichkeiten für die beiden Zunderarten zusammengestellt. Der Einfluss der Begleit- und Spurenelemente auf die Zunderereigenschaften wird oft unterbewertet. In dem Maße, wie die Anforderungen an die Oberflächengüte steigen, wird diesem Aspekt gewiss eine größere Beachtung eingeräumt werden müssen.

Zur zunderarmen Erwärmung sind Hubalkenöfen besonders prädestiniert, da sowohl die Aufheizgeschwindigkeit im oberen Temperaturgebiet als auch die Erwärmungsendtemperatur in weiten Grenzen flexibel und vor allem werkstoffgerecht gesteuert werden können. Die zweistufige Erwärmung mit unterschiedlicher Intensität ist speziell bei Hochleistungs- werkstoffen von enormem Vorteil. Seit der Ausrüstung der Walzwerke mit hydraulischen Entzunderungseinrichtungen mit Drücken von 180 ... 250 bar konnte die Oberflächengüte generell angehoben werden. Dennoch sind immer nicht wenige Beanstandungen wegen zu hoher Oberflächennarbigkeit bzw. Resten eingewalzten Zunders geltend gemacht worden. Sie gaben Anlass zu eingehenderen Untersuchungen. Außer der Zunderstruktur erwiesen sich neben dem Strahldruck, dem Volumenstrom und der Transportgeschwindigkeit Art, Anordnung, Abstand und Anstellwinkel der Düsen als nicht zu vernachlässigende signifikante Größen. Die Beurteilung der Qualität konnte am vorteilhaftesten und sichersten mittels Thermografie vorgenommen werden. Eine restlose Entzunderung war in manchen Fällen erst bei Drücken bis 450 bar nachweisbar (Tabelle 1.).

Tabelle 1. **Primärzunderentfernung des Stahles 30Mn5 mit Mini Scalemaster-Düsen**  
Tablica 1. **Skidanje primarnog odgoraka na čeliku 30Mn5 pomoću Mini - Scalemaster - Dusen**

Stahl	Qualität
200	mangelhaft
300	wechselnd
350	gut
400	sehr gut
450	sehr gut

Die Sekundärzunderbildung unterliegt einem anderen Zeitgesetz. Sie kann mathematisch durch eine zusammengesetzte linear-parabolische Funktion beschrieben werden (Bild 9.).

Bei allen Temperaturen ist für einen kurzen Zeitabschnitt, in dem die Phasengrenzreaktion dominiert, die Zuwachsrate konstant. Später wird die Diffusion der Eisenionen durch die Zunderschicht geschwindigkeitsbestimmend, so dass der zeitliche Verlauf mehr und mehr parabolisch wird. Anteilmäßig enthält der Sekundärzunder mehr Wüstite. Da die Intensität des Reaktionsablaufes in erster Linie von der Oberflächentemperatur abhängig ist, trägt jede Zwischenkühlung unmittelbar zur Hemmung der Sekundärverzunderung und der Verbesserung der Oberflächentopografie bei. Durch Fortschrittstechnologien des temperaturkontrollierten Walzens kann die Zunderdicke auf < 10  $\mu m$  und der Masseverlust bis auf 0,1 % verringert werden. Auf der Grundlage

von Oxidations - Kurvenscharen gemäß Bild 9. kann in Verbindung mit einem Temperaturmodell der Verzunderungsverlauf beim Warmwalzen werkstoff-, technologie- und abmessungsabhängig mathematisch realistisch simuliert und in seiner Dynamik vorausbestimmt werden.

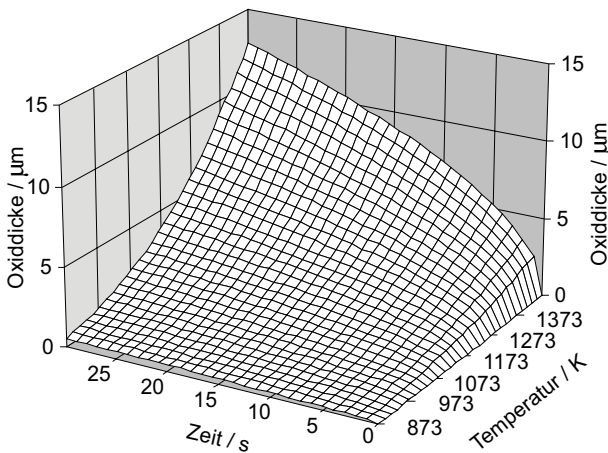


Bild 9. Temperatur- und Zeitabhängigkeit der Sekundärzunderbildung beim Stahl 25CrMo4  
Slika 9. Ovisnost stvaranja sekundarnog odgoraka o temperaturi i vremenu kod čelika 25CrMo4

### QUALITÄTSSTEIGERUNG DURCH TEMPERATURKONTROLLIERTES WALZEN VON HOCHLEISTUNGSTÄHLEN WÄZLAGERSTAHL

Von den durchhärtenden Stählen hat der Stahl 100Cr6 weltweit die größte Verbreitung und Anwendung gefunden. Er ist für die Herstellung von Wälzlagerkomponenten zu einem metallurgischen Spitzenprodukt entwickelt worden. Der Anforderungskatalog an Finalerzeugnisse hoher Güte (Bild 10.) lässt erkennen, dass die Produktion nur bei langjährigem Know-how und Berücksichtigung des neuesten wissenschaftlicher Erkenntnisstandes vorgenommen werden kann.

Das stellt Herausforderungen an alle Herstellungsstufen von der Erschmelzung bis zur Finalbearbeitung. Die walztechnischen Werkstoffforschungen konzentrieren sich bei Wälzlagerstählen seit geraumer Zeit auf das Ziel, die Weichglühung nach dem Warmwalzen vollständig zu eliminieren oder zumindest zeitlich zu verkürzen.

Aus thermodynamischen Gründen kann beim Warmwalzen von Feinstahl und Draht eine Umwandlung des Austenits in Ferrit und kugeligen Zementit nicht erzwungen werden. Dieser Gefügezustand ist zwar für die Weiterverarbeitung am zweckmäßigsten, jedoch nur über die Umwandlungsreaktion:  $\gamma - Fe \rightarrow Perlit + Fe_3C \rightarrow \alpha - Fe + (Fe_3C)_{kug.}$  d. h. durch eine sphäroidisierende Glühung zu erzielen. Diese ist mit einer Auflösung, Diffusion und Ankrystalli-

sation des Kohlenstoffes verbunden, so dass eine starke Temperatur- und Zeitabhängigkeit besteht und die Glühzeiten sich nicht selten über 15 h erstrecken. Durch die

**Qualitätsmerkmale 100Cr6**

**Reinheitsgrad:** < K3 nach DIN 50602

**Gefüge nach dem Warmwalzen:**

- Austenitkorngröße KG 9 und höher nach DIN 50601  $\equiv d_n < 15 \mu m$ ;
- Karbidgröße CG mindestens 2,3 nach SEP1520;
- Karbidnetz CN besser als 4,1 bzw. CN2;
- Karbidzeitligkeit CZ besser als 4;
- Härte HV10 < 440 (HRC < 45);
- Festigkeit  $R_m < 1250 N/mm^2$ .

**Eigenschaften nach dem GkZ - Glühen**

- zur Zerspanung HV10 < 210, zur Kaltscherung HV10 < 300;
- Festigkeit  $R_m < 850 N/mm^2$ ;
- Brucheinschnürung  $Z > 60 \%$ .

**Gefüge und Eigenschaften nach dem Vergüten**

- Perlitanteil bis Kennzahl 3, Karbidgröße CG bis 2,3;
- Karbidnetz CN bis 5,2;
- Härte HRC > 58; hohe Anlassbeständigkeit, hohe Dauerwechselfestigkeit, hohe Bruchzähigkeit, hoher Verschleiß-widerstand, geringe Rollkontaktermüdung.

Bild 10. Anforderungen an den Stahl 100Cr6  
Slika 10. Zahtjevi za čelik 100Cr6

Umformung bei niedrigen Temperaturen kann die Koagulation des Zementits aktiviert und beschleunigt werden. Zur Festlegung der geeignetsten Walztechnologien für das Stab-/Drahtwalzen wurden in mehreren Versuchreihen die Endwalztemperaturen systematisch erniedrigt und neben dem Kalteinsatz auch der Heißeinsatz einbezogen. Die Ergebnisdarstellungen in Bild 11. beziehen sich auf das Walzen von Stäben mit 16 mm  $\varnothing$ . Die Temperatureinstellung ist durch eine Zwischenkühlung vor der Endumformung in 4 Stichen mit einer Gesamtabnahme von  $\epsilon_A = 36 \%$  ( $\varphi = 0,45$ ) vorgenommen worden.

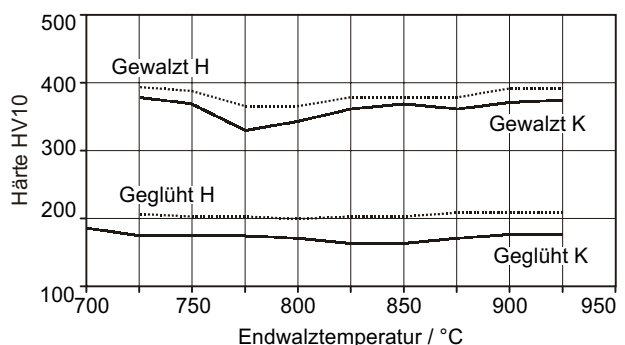


Bild 11. Härte des Stahles 100Cr6 (16 mm  $\varnothing$ ) in Abhängigkeit von der Endwalztemperatur, H - Heißeinsatz, K - Kalteinsatz  
Slika 11. Tvrdća čelika 100Cr6 ( $\varnothing = 16 mm$ ) u ovisnosti o konačnoj temperaturi valjanja: H = vrući uložak, K = hladni uložak



Es ist erkennbar, dass ein möglicher Heißeinsatz ohne gravierende nachteilige Auswirkungen auf die Endeigenschaften praktiziert werden kann, obwohl sich die Gefügefeynung in diesem Fall ausschließlich auf die Rekristallisation reduziert. Das Austenitgefüge konnte auf einen mittleren Korndurchmesser von 16 bis 20  $\mu\text{m}$  verfeinert werden. Besonders die mehrfache dynamische Rekristallisation hat dazu beigetragen. Der kritische Umformgrad zur Einleitung der dynamischen Rekristallisation wurde unabhängig von der Erwärmungsart zu  $\varphi_k = 0,1 \dots 0,36$  ermittelt, wobei die höheren Werte den tieferen Temperaturen und höheren Umformgeschwindigkeiten zuzuordnen sind.

Nach Bild 11. erscheint der Effekt der Temperaturabsenkung nicht erheblich. Dies ist bei weitem nicht so. Er bezieht sich lediglich auf die Festigkeitseigenschaften des Gefüges nach der Abkühlung. Diese werden natürlich von der Struktur des Perlits bestimmt. Tatsächlich wurde durch die Niedertemperaturwalzung die Ausscheidung von Sekundärzementit an den Korngrenzen weitgehend unterdrückt. Bei Temperaturen unter 860 °C wurden keinerlei schalenartige Zementitfragmente an den Korngrenzen gefunden. Bei der Abkühlung bis auf 550...570 °C mit einer mittleren Geschwindigkeit von  $>3..5 \text{ K/s}$  entsteht feinstreifiger Perlit, der mit einem Lamellenabstand von  $S = 0,120 \dots 0,190 \mu\text{m}$  schon in Sorbit übergeht. Dieser Gefügezustand ist Garant, dass der Zementit bei der Glühung extrem schnell sehr feindispers und in gleichmäßiger Verteilung koaguliert. Für eine nachfolgende Kaltumformung, Zerspanung und Härtung ist die außerordentlich vorteilhaft. Als besonders günstig haben sich Endwalztemperatur von 750 bis 820 °C herauskristallisiert. Die Glühzeit konnte auf weniger als 1/5 der sonst üblichen Zeit verringert, die Bruchzähigkeit auf 67 bis 72 % gesteigert werden. Beim Drahtwalzen können durch Zwischenkühlung der Walzadern auf analoge Temperaturen grundsätzlich gleiche Rationalisierungs- und Qualitätseffekte verzeichnet werden.

**C - STÄHLE  
FÜR HOCHFESTE KALTGEZOGENE FEDERN**

Perlitisch - sorbitische kaltgezogene Federstahldrähte werden ebenso wie Cord- und Spannstahl - Drähte aus hochgekohten untereutektoiden, manchmal auch aus eutektoiden unlegierten Stählen hergestellt. Ihr Festigkeitsspektrum ist nicht nur sehr weit gesteckt, sondern mit Werten bis zu 3500 N/mm<sup>2</sup> bei dünnen Drähten auch sehr hoch, weshalb sie zu den hochwertigsten Stahlwerkstoffen zuzuordnen sind. Die Maßstäbe an die Produktqualität sind ständig gestiegen. Die Kennwerte, die den Gebrauchswert bestimmen, sind ständig erhöht und eingengt worden, und sie werden in Zukunft noch höher und enger gesetzt werden müssen. Die grundsätzlichen Möglichkeiten zur Anhebung und Verbesserung der Werkstoffeigenschaften beschränken

sich bei Stählen mit sorbitisch - perlitischem Gefüge, auf die Mischkristallhärtung ( $\Delta R_m^M$ ), Korn- und Gefügefeynung ( $\Delta R_m^K$ ), die Ausscheidungshärtung der Ferritphase durch Karbide bzw. Karbontride ( $\Delta R_m^A$ ) und die Verfestigung durch Kaltumformung ( $\Delta R_m^U$ ) (Bild 12.).

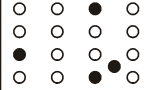
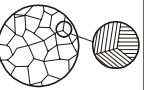
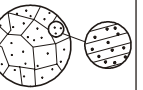
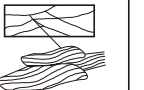
Patentiert kaltgezogene Federstähle			
Verfestigungsmechanismen			
Mischkristallhärtung	Korn- und Gefügefeynung	Ausscheidungshärtung	Umformverfestigung
$\Delta R_m^M$	$\Delta R_m^K$	$\Delta R_m^A$	$\Delta R_m^U$
			
↓	↓	↓	↓
$\Delta R_m^M$ bei 0,1 % C = 100 MPa Cr = 20 MPa Si = 10-15 MPa Mn = 2-4 MPa	$\Delta R_m^K =$ 100-750 MPa	$\Delta R_m^A$ bei 0,01 % V = 8-15 MPa Nb = 15 - 25 MPa	$\Delta R_m^U - \sigma^n$ $\Delta R_m^U = 500$ - 2500 MPa

Bild 12. Verfestigungsmechanismen bei hochgekohten Federstahldrähten  
Slika 12. Mehanizmi očvršćivanja kod viskouglijčnih čeličnih žica za opruge

Die Wirkung der einzelnen Maßnahmen ist unterschiedlich und bis auf die Gefügefeynung immer mit einer Verschlechterung der plastischen Eigenschaften verbunden. Für eine weitere Erhöhung der Festigkeitseigenschaften der Drähte über das bekannte Maß hinaus können nur die Mischkristallhärtung durch Cr, Si bzw. Mn und die Ausscheidungshärtung durch Mikrolegierung mit V und/oder Nb in Betracht gezogen werden. Die Möglichkeiten der Gefügefeynung des Perlits durch Steuerung der Abkühlung im Bereich der Gefügeumwandlung sind schon weitgehend ausgereizt. Die Einflussnahme auf die Werkstoffverfestigung durch Kaltumformung schließt sich aufgrund der dabei ablaufenden mikromechanischen Vorgänge aus. Die Verfestigungsneigung und -fähigkeit sind bei hochgekohten Stählen zudem kaum vom C- Gehalt abhängig und über den Legierungsgrad nur wenig beeinflussbar. Ausschlaggebend für die erreichbare Qualität ist, gleichgültig welcher Abmessungsbereich in Betracht gezogen wird, letztlich die Grundfestigkeit des perlitisch - sorbitischen Gefüges. Das bedeutet zugleich, jede zusätzliche legierungs- bzw. mikrolegierungstechnisch verursachte Festigkeitserhöhung muss entweder durch eine weitere Verbesserung des Reinheitsgrades oder durch eine noch wirksamere Gefügefeynung kompensiert werden. Über den Erfolg aller Maßnahmen, das Eigenschaftsniveau über Variation der chemischen Zusammensetzung zu verschieben, entscheidet maßgebend die Prozessführung beim Walzen. Das gilt auch für den Fall, dass abmessungsabhängig eine oder mehrere Patentierungen durchgeführt werden müssen. Nur ein sehr gleichmäßiges fein- bis feinstlamellarer Perlit ohne Phasenanteile

von Ferrit bzw. Zementit an den Korngrenzen kann die Anforderungskriterien erfüllen. Bestimmende Gefügeparameter sind der Lamellenabstand und die Größe der Perlitkolonien. Umform- und Abkühlungsbedingungen müssen insofern differenziert festgelegt werden, als die Legierungselemente auch das Umwandlungsverhalten verändern. Mit zunehmendem Gehalt an Si, Mn und Cr wird die Perlitbildung zu höheren Temperaturen und kürzeren Zeiten verschoben. In gleicher Weise wirken feinere sowie auch nach dem Walzen nichtvollständig entfestigte Austenitgefüge, denn alle mit C angereicherten Bezirke des Austenits (Korngrenzen, Ausscheidungen, Versetzungskonzentrationen etc.) sind potentielle Keimstellen für den Perlit. Die mathematische Simulation der Gefügebildungsvorgänge bis hin zu den mechanischen Eigenschaften ist für die Auffindung der Walz- und Abkühlungsbedingungen sehr hilfreich und erweist sich zunehmend als unentbehrlich. Sie setzt die Ermittlung der thermophysikalischen, thermokinetischen und umformtechnischen Kennwerte der Stähle voraus. Das kann nur zum Teil in traditionellen Grundversuchen erfolgen. In der Hauptsache muss die Bestimmung jedoch direkt beim Walzen erfolgen. Die institutseigene Versuchswalzanlage hat sich hierfür besonders bewährt, da unter praxisgleichen technologischen Verhältnissen gewalzt werden kann. Die Versuche erstreckten sich auf SiCr- und mit NbV mikrolegierte Stähle mit 0,80 % C. Bild 13. widerspiegelt die mechanischen Eigenschaften der nach werkstoffangepassten Technolo-

gien hergestellten Stahldrähte im Walz- und gezogenem Zustand. Ohne die Ergebnisse im Einzelnen zu kommentieren, verdeutlicht die Gegenüberstellung, dass die beabsichtigten Effekte gut zur Geltung gebracht wurden und industriell umgesetzt werden können.

**KALTSTAUCHSTAHL**

Die Schwerpunktsetzungen bei diesen Stählen, die einerseits die Entwicklung von Stählen zur prozessstufenarmen Verarbeitung der Stäbe/Drähte zu Formteilen unter Ausschluss von Zwischenwärmebehandlungen (sphäroidisierende Glühungen o. a.) und/oder einer Schlussvergütung und andererseits die Reduzierung des Legierungsgrades im Sinne einer besseren Nutzung von Ressourcen und einer verbesserten Materialökonomie bei gleich bleibendem bzw. höherem Gebrauchswert zum

Tabelle 2. **Mechanische Eigenschaften von Kaltstauchstählen in Abhängigkeit von der Endwalztemperatur**  
 Tablica 2. **Mehanička svojstva hladno sabijanih čelika u ovisnosti o temperaturi zadnje provlake kod valjanja**

Stahl	20 MnV 6	32 CrB 4	37 Cr 4	42 CrMo 4
Temp./ °C	770 950	780 900/950	765 985	770 990
R <sub>m</sub> / MPa	660 670	640 > 680	710 800	820 900
Z / %	70 64	45-55 35-45	> 60 58	50 44

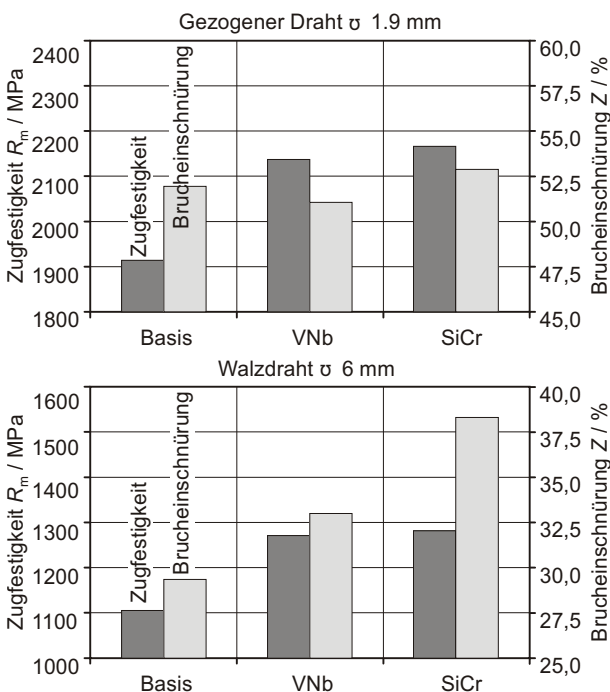


Bild 13. **Eigenschaften verschiedener Federstähle, gewalzt nach wissenschaftlichen Technologien**  
 Slika 13. **Svojstva različitih čelika za opruge, valjanih tehnologijama razvijenim na znanstvenom temelju**

Inhalt haben, wurden bereits vor mehr als 20 Jahren in Angriff genommen. Sie haben dennoch nicht an Bedeutung verloren. Im Gegenteil, die Industrie ist an kreativen Lösungen nach wie vor sehr interessiert. Immerhin lässt sich durch Wegfall einer Zwischenwärmebehandlung eine Energieersparnis von 0,8 bis 1,6 (teilweise sogar bis 2,0) GJ/t erzielen und der Arbeitsaufwand um mindestens 0,5 bis 1,2 h/t vermindern. Die Prozesskette wird schlanker gestaltet, die Produktivität in Verarbeitungsstufen letztlich gesteigert werden. Im Rahmen dieser Ausführungen kann auf die Gesamtproblematik und die sich anbietenden Lösungsansätze nicht eingegangen werden. Stattdessen sei nur auf die Vorteile einer temperaturkontrollierten Walzung bei abgesenkter Temperatur hingewiesen.

Bei dieser Art der Thermomechanischen Behandlung entsteht durch das Walzen mit ausreichender Umformung oberhalb der Umwandlungs- und Rekristallisationstemperatur des Austenits ein feinkörniges Austenitgefüge, aus dem sich bei entsprechend gesteuerter Abkühlung im Temperaturgebiet der Phasenumwandlung ein günstiges Sekundärgefüge entwickeln kann. Da die Umwandlung des Austenits zu Ferrit infolge der höheren Keimdichtezahl an mehreren Stellen einsetzt und beschleunigt wird, ist die Festigkeit bei gleicher chemischer Zusammensetzung wegen des höheren Ferritanteiles im Gefüge sogar merkbar geringer als bei unkontrolliertem Walzen, die Kaltumform-

barkeit dafür aber höher. Beispielsweise wurden bei Kaltstachstählen allein durch Absenkung der Endwalztemperatur von 950 bis 990 °C auf 765 bis 780 °C folgende Eigenschaftsniveaus erzielt.

Modifizierungen in der chemischen Zusammensetzung ermöglichen bei ferritisch-perlitischen Stählen die Einstellung eines Gefüge- und Eigenschaftspotentials, das durch die Kenngrößen:

- Perlitanteil  $V_p \leq 40$  (50) %,
- Ferritkorngröße  $D_\alpha \leq 10 \mu\text{m}$ ;
- Zugfestigkeit  $R_m = 630 \dots 780$  MPa,
- Streckgrenze  $R_{p0,2} = (430) 580 \dots 640$  MPa;
- Einschürung  $Z = 53 \dots 70$  %,
- Bruchdehnung  $A_5 = 22 \dots 38$  %;
- Bruchumformgrad  $\varepsilon_{Br} > 2,3$ ,
- Umformverfestigung  $R_m = 1054 \cdot \varphi^{0,213}$  für  $\varphi < 0,5$ .

Gekennzeichnet ist und eine die Herstellung von Normteilen der Festigkeitsklasse 8.8 ohne Zwischenwärmebehandlung und ohne Schlussvergütung gestattet.

Eine andere technologische Alternative ist die Abkühlung nach dem Walzen so zu führen, dass ein Dualphasengefüge bestehend aus Ferrit ( $V_F > 80$  %) und Martensit ( $V_M < 25$  %) entsteht. Am ehesten kann dies bei Stählen auf der MnSi - Basis erreicht werden. Bedingt eignen sich

dafür auch Stähle mit angehobenem Cr- und Mo- Gehalt. Die mechanischen Eigenschaften sind mit:

- Zugfestigkeit  $R_m = 560 \dots 700$  MPa,
- Streckgrenze  $R_{p0,2} = 400 \dots 540$  MPa;
- Einschürung  $Z = 60 \dots 73$  %,
- Bruchdehnung  $A_5 = 25 \dots 38$  %;
- Bruchumformgrad  $\varepsilon_{Br} > 2,8$ ,
- Umformverfestigung  $R_m = 1018 \cdot \varphi^{0,158}$  für  $\varphi < 0,5$ .

Den mikrolegierter AFP - Stähle durchaus äquivalent.

Beide Verfahrensarten sind ein Spiegelbild der Leistungs- und Qualitätsfähigkeit moderner Walztechnologien.

## LITERATUR

- [1] W. Lehnert: in Tagungsband Meform 97 „On-line Qualitätsüberwachung und -kontrolle bei der Umformung“, TU Bergakademie, Freiberg 1997.
- [2] D. Ameling Stahl und Eisen 123 (2003) 12, 70 - 91.
- [3] R. Kawalla u. a., Metallurgija 41 (2002) 3, 171 - 182.
- [4] P. van Hüllen u. a., Stahl und Eisen 123 (2003) 11, 93 - 98.
- [5] F. Reitmann u. a., Stahl und Eisen 123 (2003) 3, 69 - 73.
- [6] J. Lemke u. a., Kalibreur 63 (2002), 21 - 23.
- [7] Fr. Paternoster u. a., Kalibreur 63 (2002), 7 - 20.
- [8] M. Lestani u. a., Stahl und Eisen 122 (2002) 3, 69 - 73.
- [9] W. Brahmman u. a., Stahl und Eisen 117 (1997) 3, 59 - 66.
- [10] R. Kawalla u. a., Metallurgija 39 (2000) 3, 131 - 138.