

PROZEß-, ANLAGEN- UND PRODUKTENTWICKLUNGEN BEIM WALZEN VON STABSTAHL UND DRAHT

Received - Primljeno: 2001-12-09
Accepted - Prihvaćeno: 2002-03-15
Review Paper - Pregledni rad

Der Bedarf an Stabstählen und Drähten in Art, Menge und Qualität hat sich in der Vergangenheit wesentlich verändert. Die Fortschritte in der Walzwerkstechnik waren und sind ausschlaggebend, daß bemerkenswerte Qualitätsverbesserungen anvisiert und erzielt werden konnten. Für die Zukunft kann vor allem eine weitere Verschärfung der Maßstäbe an die Produktqualität prognostiziert werden. Technologisch kommt bei allen Stählen der werkstoffgerechten Temperaturführung beim Walzen eine besondere Bedeutung zu. Die Zuverlässigkeit der Prozeßführung ist sowohl ausschlaggebend für das erreichbare Qualitätsniveau als auch für die Treffsicherheit, mit der die Qualitätsparameter bei den verschiedenen Walzerzeugnissen erzielt werden können. Mit Hilfe integrierter Prozeßmodelle, die die werkstoffspezifischen, verfahrens- und anlagentechnischen Besonderheiten gleichermaßen berücksichtigen, können Technologien simuliert, bewertet und optimiert, die Walzprozesse präzise gesteuert werden. Der wissenschaftliche Erkenntnisstand der Modellierung und Simulation beim Warmwalzen hat einen hohen Stand erreicht und ist nunmehr auch für das Walzen von Stabstahl und Draht relativ weit fortgeschritten. Er bietet die Basis für nachhaltige technisch-technologische Innovationen.

Schlüsselworte: *stabwalzwerke, drahtwalzwerke, walztechnologie, walzprodukte, technisch - technologische entwicklungen, prozeßmodellierung, gefüge- und eigenschaftssimulation*

Razvoj procesa, postrojenja i proizvoda u valjaonici čeličnih šipki i žice. Potreba za čeličnim šipkama i žicama različitih vrsta, količina i kakvoća znatno se promijenila od one ranije. Napredak u tehnici valjanja je bio i ostao od odlučujućeg značenja za sagledavanje mogućnosti primjetnog poboljšanja kvalitete i realizacije tog poboljšanja. Što se tiče budućih promjena možemo prije svega govoriti o daljnjem izoštravanju mjerila za utvrđivanje kvalitete proizvoda. Tehnološki gledano, kod proizvodnje svih vrsta čelika veliki značaj se pridaje pravilnom dovođenju temperature. Pouzdanost u vođenju tog procesa ima jednako odlučujuću ulogu u dostizanju određenog stupnja kakvoće kao i sigurnosti postizanja parametara kakvoće za različite proizvode valjanja. Pomoću integriranih modela procesa koji uzimaju u obzir podjednako karakteristike specifične za neki materijal, za neki postupak i za tehničke osobitosti nekog postrojenja, mogu se simulirati tehnologije, procjenjivati njihova vrijednost i izvršiti njihova optimalizacija tako da se procesima valjanja može upravljati maksimalnom preciznošću. Znanost je u modeliranju i simulaciji toplog valjanja dostigla visoki stupanj pa je u tom smislu relativno daleko uznapredovala i u valjanju čeličnih šipki i žice. Takav stupanj znanosti pruža osnovu za trajne tehničko-tehnološke inovacije.

Ključne riječi: *valjaonica šipki, valjaonica žice, tehnologija valjanja, proizvodi valjanja, tehničko-tehnološki razvoj, modeliranje procesa, simulacija strukture i svojstava*

EINLEITUNG

Stabstahl und Draht sind wichtige Sortimentsgruppen warmgewalzter Langprodukte in allen Ländern. Diese werden in den verschiedensten Industriezweigen teilweise direkt im Walzzustand, teilweise nach einer weiteren

Umformung zu Formteilen, Federn, gezogenen Drähten, Litzen, Seilen etc. eingesetzt. Entsprechend dem industriellen Fortschritt hat sich das Anforderungsprofil an die Qualität und an die Menge dieser speziellen Walzprodukte geändert. Gewandelt hat sich auch die Walztechnik. Die Orientierungsziele der technisch - technologischen Entwicklung von Stabstahl- und Drahtwalzwerken unterscheidet sich nicht generell von denen anderer Industriebe- reiche und Walzanlagen. Sie weisen jedoch spezielle

R. Kawalla, W. Lehnert, Institut für Metallformung, TU Bergakademie Freiberg, BRD

Schwerpunkte und Besonderheiten auf. Walzwerke der neuesten Generation können flexibel bei hoher Produktivität und Wirtschaftlichkeit betrieben und dennoch zur Herstellung von Produkte in hoher und höchster Qualität eingesetzt werden. Einen unverkennbar wichtigen Beitrag zur Prozeß-, Anlagen- und Produktentwicklung haben die mathematische Modellierung und Simulation des Walzvorganges und der Veränderungen in den Struktur - Gefüge - Eigenschaftsmerkmalen des Werkstoffes geleistet. Der Überblick über den aktuellen Stand bei der wissenschaftlichen Durchdringung der einzelnen Prozeßstufen soll die Leistungsfähigkeit dieser Methoden verdeutlichen, zu deren verstärkter technischer Nutzung anregen und das sich dadurch eröffnende Innovationspotential beleuchten.

**WANDEL
DER STAHLHERSTELLUNGSVERFAHREN**

Obwohl Aluminium und Polymerwerkstoff zunehmend Einsatz im Leichtbau finden, erweisen sich Stähle in der Technik sowohl als Konstruktions- und auch als Funktionswerkstoffe sehr nützlich, wertvoll und unentbehrlich. Wegen ihrer markanten und auf den jeweiligen Verwendungszweck abstimmbaren Eigenschaften, ihrer günstigen Verarbeitbarkeit und ihrer unproblematischen Recyclebarkeit besitzen Stähle einen hohen Gebrauchswert. Ihr Marktanteil hat sich laufend vergrößert. Die klassischen Einsatzbereiche haben eine weitere Ausbreitung erfahren. Im Jahr 2000 hat die Rohstahlproduktion weltweit erstmals einen Rekordwert von etwas über 825 Mio. tonne erreicht. Bild 1. verdeutlicht an der Darstellung der Produktionszahlen in den letzten 20 Jahren die stürmische Entwicklung und läßt gleichzeitig den tiefgreifenden Wandel in den Produktionsverfahren erkennen. Trotz rezessionsbedingter Schwankungen kann für Rohstahl eine mittlere Zuwachsrate von 5.68 Mio t/a verzeichnet werden, die für die nachfolgenden Produktionsstufe Strangguß und für den Walzstahl mit 24.46 Mio t/a bzw. 6.03 Mio t/a noch höher ausfällt.

Gleichzeitig mit der Ausweitung der Stahlproduktion ist die klassische Art der Stahlerzeugung nach dem Siemens - Martin- Verfahren sukzessive bis zur Bedeutungslosigkeit zgedrängt worden. Das gleiche gilt, wenn auch nicht in dieser Ausschließlichkeit, für den Blockguß. Der Strangguß ist in kurzer Zeit zum dominierenden Gießverfahren entwickelt worden. Es entfällt auf ihn bereits ein Anteil von 83 % der Gesmtrohstahlproduktion, der sich noch weiter erhöhen wird. Der Anstieg des Verhältnisses von Walzstahl zu Rohstahl auf über 84 % ist ein Indiz der Ausbringungsverbesserung, die letztlich ursächlich auf die Beherrschung des Stranggießens von Vorbrammen-, Vorblock- und Knüppelformaten zurückzuführen ist. Die in Bild 1. angegebenen Produktionszahlen beziehen sich auf die Gesamtheit der warmgewalzten Stahlerzeugnisse. Für den Sektor der Flach- und Langprodukte liegen jeweils

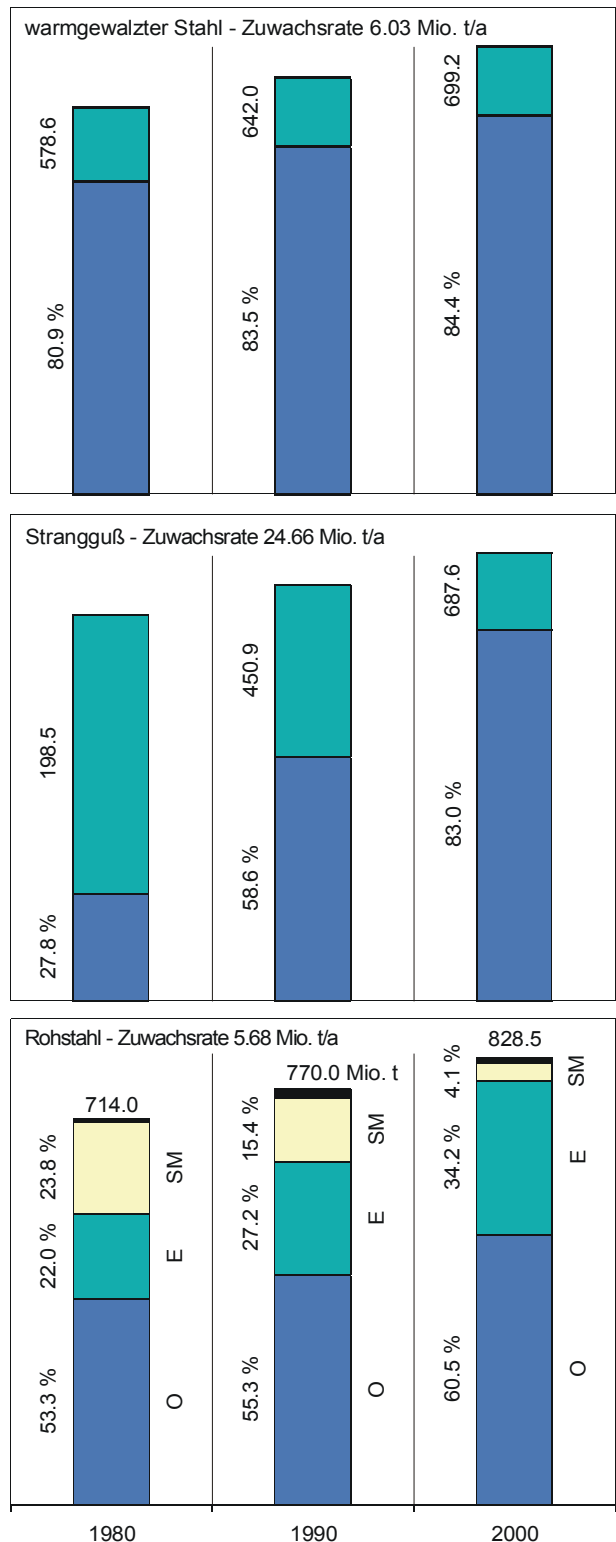


Bild 1. Entwicklung der Rohstahl-, Strangguß- und Walzstahlerzeugung in der Welt seit 1980 (E - Elektro Stahl; O - Oxygenstahl; SM - Stahl; sonstiger Stahl)
Slika 1. Razvoj proizvodnje čelika u svijetu od 1980. godine - sirovog željeza, kontinuirano lijevanog čelika, valjanog čelika (E - elektročelik; O - čelik dobiven u konvertoru; čelik iz SM peći; ostali čelik)

andere Verhältnisse vor. Während die Erzeugungsrouten Hochofen - Sauerstoffaufblaskonverter - Pflannenofen vor allem in den integrierten Stahlwerken zur Herstellung von Warmband und Grobblechen praktiziert wird, werden Langprodukte mehrheitlich nach der E - Stahl - Technologie hergestellt. Diese Technologie mit den in Bild 2. symbolisiert dargestellten Prozeßstufen bildet die Basis

Elektroenergie sowie den Schrott haben diese Entwicklung begünstigt. E - Stähle aller Stahlgüten können in ihrer chemischen Zusammensetzung mit hoher Treffsicherheit und einem angemessenen Reinheitsgrad reproduzierbar erschmolzen werden. Durch eine multifunktionelle sekundärmetallurgische Nachbehandlung in der Pflanne, die nach Stahlgüte das Spülen, Nachschmelzen und Vakuumentgasen umfaßt, kann die Raffination der Schmelzen sehr weit getrieben und vielseitigen Qualitätsanforderungen angepaßt werden. Allerdings sind Kontrolle und Begrenzung der Gehalte an den metallurgisch nur schwer entfernbaren metallischen Begleitelementen Cu, Sn, Pb, Cr, Mo, Ni wegen der unausbleiblichen Schrottverunreinigung lediglich durch gezielte Schrottauswahl und/oder durch Verdünnung der Schmelze mit weniger belastetem Roheisen bzw. Eisenschwamm möglich. Ziel von laufenden Stahlewicklungen ist, die Maximalgehalte an Spuren- und Begleitelemente stahl- und produktspezifisch auf den späteren Verwendungszweck abzustimmen bzw. deren Wirkung zur Verbesserung der Stahleigenschaften (Festigkeit, Härbarkeit usw.) auszunutzen oder durch andere Legierungselemente zu kompensieren. Die Fortschritte in der Stranggußtechnik basieren auf der hermetischen Abschirmung des Gießstrahles mit Schutzgas oder Tauchausgüssen, dem elektromagnetischen Rühren sowie der Einhaltung günstiger Gießtemperaturen und Erstarrungsgeschwindigkeiten. Der Gefahr der Bildung von Rißseige-

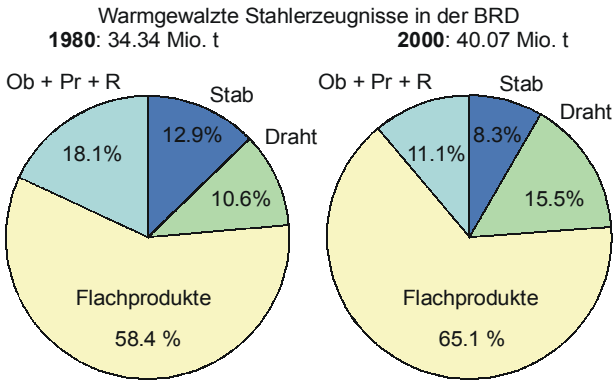


Bild 2. Änderungen im Walzstahlsortiment (Ob - Oberbau; Pr - Profile; R - nahtlose Rohre)
 Slika 2. Promjene u asortimanu valjanog čelika (Ob - nadzemna gradnja, Pr - profil, R - bešavne cijevi)

für Ministahlwerke mit einer Kapazität von 0.8 bis 2.0 Mio t Stahl im Jahr. Die größere Freizügigkeit in der Standortwahl und die kostengünstigen Voraussetzungen für die

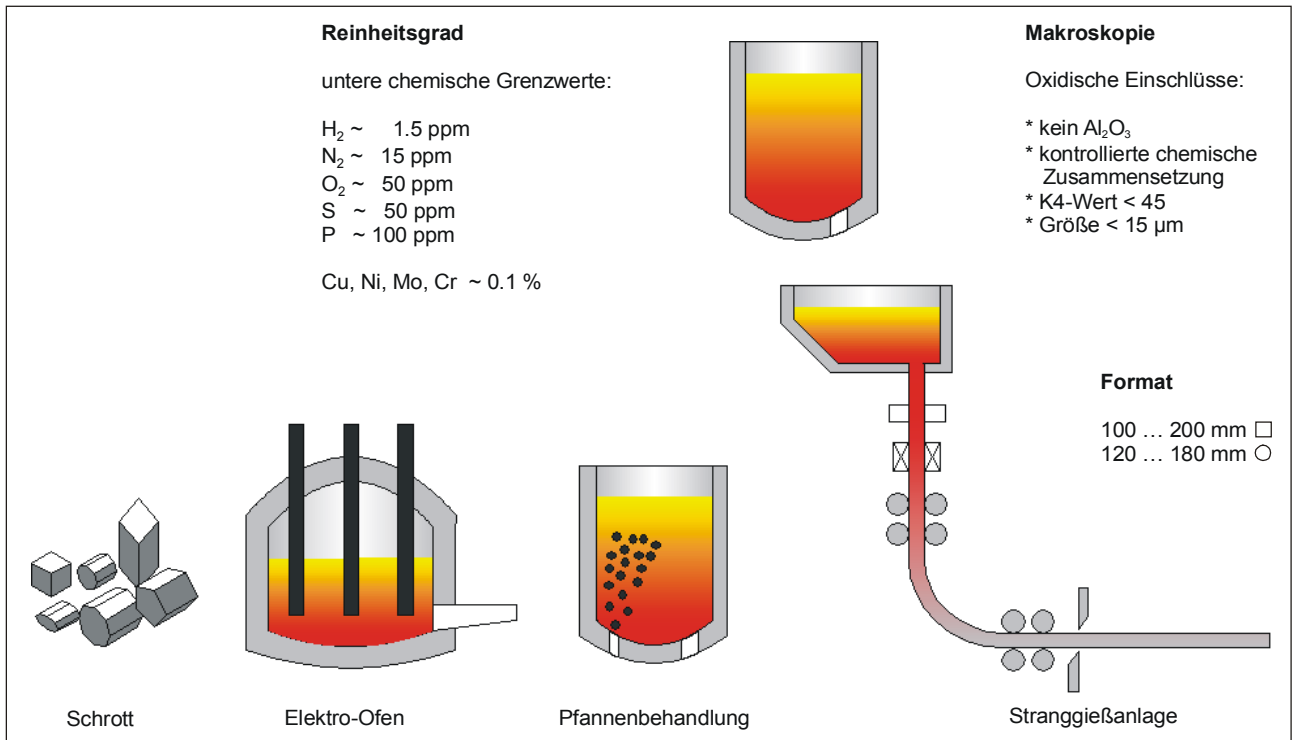


Bild 3. Verfahrensweg der Vormaterialherstellung für Stabstahl und Draht
 Slika 3. Postupak proizvodnje poluproizvoda za izradu čeličnih šipki i žice

rungen, Innen- und Kantenrissen konnte und kann bei den meistens Stählen durch Anhebung des Mn/S - Verhältnisses und Optimierung der chemischen Zusammensetzung begegnet werden [1-2]. Der gegenwärtige technische Stand der Ministahlwerke bietet Gewähr, qualitätssicher ein gleichmäßiges und hochwertiges Vormaterial herzustellen. Lediglich die Erschmelzung aluminiumfreier supercleaner und ultrasuperleaner Stähle, wie z. B. Ventildfederstähle in der Güte 54SiCr6 und Wälzlagerstähle 100Cr6, sollte dagegen der Blasstahltechnologie vorbehalten sein [3-5]. Insgesamt hat in den unmittelbar zurückliegenden Jahren stahlmarkenseitig eine Verschiebung von den einfachen Baustählen zu den legierten und unlegierten Qualitätsstählen sowie den legierten und nichtrostenden Edelstählen stattgefunden.

**VERSCHIEBUNGEN IM SORTIMENT
WARMGEWALZTER STAHLERZEUGNISSE**

Bild 3. widerspiegelt die Veränderungen in der Sortimentsstruktur warmgewalzter Erzeugnisse in den letzten 20 Jahren für Deutschland. Da in der BRD die Walzstahlerzeugung auf qualitativ hochwertige Stähle für die Automobilindustrie ausgerichtet ist, sind die Einzelwerte nicht unbedingt repräsentativ für alle Länder. Der Trend des anteilmäßig starken Anstieges von Flachstahl am gesamten Walzstahlaufkommen ist überall zu verzeichnen. Trotz prozentualen Rückganges ist Jahresproduktion von Langprodukten annähernd konstant geblieben. Innerhalb dieser Gruppe haben jedoch beträchtliche Verschie-

bungen stattgefunden. Der Anteil an Walzdraht und feinem Stabstahl hat sich nennenswert erhöht. Dies hat zur Rekonstruktion alter Walzstraßen und zum Aufbau neuer Walzanlagen geführt. Ausdruck dieser erheblichen Veränderungen im Walzstahlbedarf ist, daß seit 1990 weltweit 33 Drahtwalzstraßen, 23 kombinierte Stabstahl - Drahtwalzwerke und 96 Stabwalzstraßen neu gebaut bzw. umfassend rekonstruiert und modernisiert worden sind.

**GLOBALE UND SPEZIELLE
WALZTECHNISCHE ENTWICKLUNGSZIELE**

Um die Wettbewerbsfähigkeit der Walzwerke bei zunehmender Globalisierung der Wirtschaft zu gewährleisten und für einen längeren Zeitabschnitt zu sichern, sind die Bestrebungen zur Vereinfachung der Produktion, zur Erhöhung der Produktivität und der Flexibilität sowie zur Erzielung einer hohen Produktqualität und Umweltverträglichkeit zu markanten Zielen des technischen Fortschrittes geworden. Sie wurden für die Betreiber und Hersteller von Walzanlagen gleichermaßen zu einem ungeschriebenen Programm der Modernisierung der Walztechnik sowie der Entwicklung vollkommen neuer technologischer Konzepte und Methoden (Bild 4.). Besonders in den Zeiten wirtschaftlicher Rezession wurden diesbezüglich neue Triebkräfte freigesetzt. Die Walztechniken und Walztechnologien konnten generell auf ein höheres Niveau gestellt werden. Die Maßstäbe an die Genauigkeit und Einhaltung technologischer Vorgaben haben sich verschärft. Die Effekte sind unverkennbar, vielfältig und relativ groß. Zum gegenwärtigen

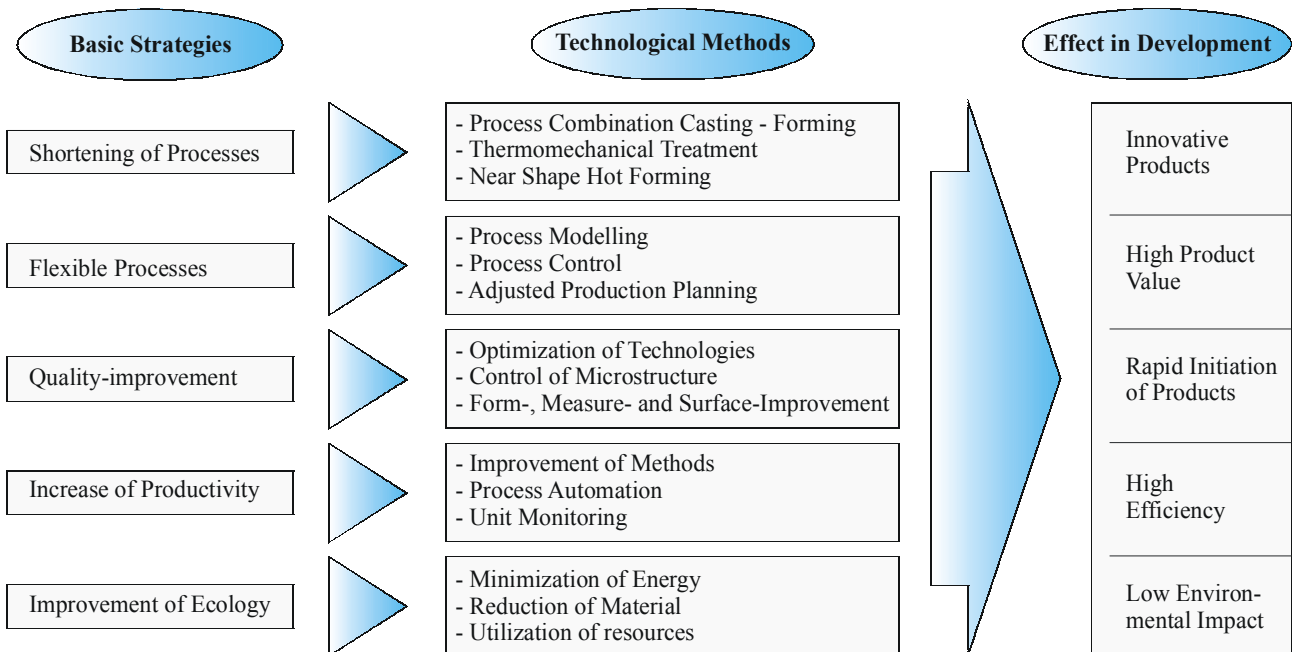


Bild 4. Gegenwärtige Entwicklungstrends in der Walztechnologie
Slika 4. Aktualni trendovi razvoja valjačkih tehnologija

tigen Zeitpunkt kommt für das Walzen von Stabstahl und Draht speziell der Einsparung an Energie, der Verbesserung der Maßhaltigkeit und der werkstoffgerechten Temperaturführung im Sinne einer thermo-mechanischen Behandlung der Werkstoffe zur Umgehung nachfolgender Wärmebehandlungen eine zentrale Vorrangstellung zu.

MERKMALE MODERNER STABSTAHL - UND DRAHTWALZWERKE

Stabstahl - und Drahtwalzwerke der neuesten Generation sind in der Regel für eine hohe Produktionskapazität und ein begrenztes Produktionssortiment ausgelegt. Sie können einerseits mit relativ hoher Produktivität (bis über 15 t/PA-h) und Wirtschaftlichkeit betrieben werden, andererseits sind qualitativ hochwertige Erzeugnisse herstellbar. Die weitgehende Automatisierung bis hin zur computergestützten Prozeßsteuerung ist ausschlaggebend, daß dennoch eine Flexibilität in der Walzprogrammgestaltung gewahrt wird. In Tabelle 1. sind die Merkmale des aktuellen Standes für diesen Sektor der Walzwerkstechnik zusammengestellt. Bei Drahtstraßen wurde der Abmessungsbereich auf 4.0 bis 25 mm Ø gespreizt, wobei natürlich für die dickeren Drähte Garrethaspeln eingesetzt werden. Spezielle Konstruktionen von Wickelwerke führten dazu, daß Rundstähle bis 52 mm Ø nunmehr in Bundform ausgeliefert werden können. Charakterisch für alle Walzstraßen ist die Erhöhung der Knüppelanstichquerschnitte von ursprünglich 105 bis 120 mm □ auf 160 bis 200 mm □. Rundstrangguß kommt vorwiegend nur bei legierten Edeltählen zum Einsatz. Für die Erwärmung werden Hubbalkenöfen wegen der einfacheren Entleerbarkeit und der Beschickung bei Programmwechseln und Produktionsumstellungen bevorzugt. Sie gestatten außerdem bei entsprechender Unterteilung des Hubherdes eine zwei-stufige Erwärmung mit unterschiedlicher Intensität, was für legierte Stähle von Vorteil ist. Wärmetechnisch und wärmewirtschaftlich besteht weitgehende Äquivalenz zu Stoßöfen. Feinfühligte Temperatursteuerungen ermöglichen bei beiden Öfen, den thermophysikalischen Eigenschaften der Werkstoffe und den jeweiligen Erfordernissen an die Wärmequalität Rechnung zu tragen. Sie sichern einerseits eine entkohlungs- und zunderarme Erwärmung mit einem vorgeprägtem axialen Temperaturkeil und andererseits auch die reproduzierbare Einhaltung der stahlmarkenspezifischen Erwärmungstemperaturen. Durch die hydraulische Entzunderung mit ≥ 250 bar im Anschluß an die Erwärmung wird der Primärzunder restlos beseitigt, so daß eine hohe Oberffächengüte erzielbar wird. Für das Zusammenschweißen der Knüppel zu einem endlosen Strang wurden in der jüngsten Vergangenheit Abbrennstumpfschweiß- und Entgratungsmaschinen entwickelt [6-7]. Damit wurde eine Verfahrenstechnik aufgegriffen, die schon von der Firma SKET vor über 30 Jahren im Werk

Makeevka eingeführt wurde. In weniger als 50 Sekunden können Knüppel gleicher oder verschiedener Stalilgüte on - line verschweißt werden. Die Zahl der Walzstörungen und Havarien wird bei dieser Walzweise drastisch verringert, die reine Walzzeit erhöht. Die Produktion soll um 12 bis 15 % ansteigen. Zu starke Temperaturabfälle können

Tabelle 1. **Stand der Technik von Stabstahl- und Drahtstraßen für Qualitäts- und Edeltähle**
 Tablica 1. **Stupanj razvoja tehnike na prugama za valjanje šipki i žica od kvalitetnih i plemenitih čelika**

Vormaterial	
100 % Strangguß	
Anstichquerschnitt	120...160 (200) mm □ bzw. Ø
Knüppellänge	12 000 mm
Knüppelmasse	bis > 3500 kg
Warmeinsatz	($\vartheta = 600 - 800^{\circ}C$) > 50 (80) %
Direkteinsatz	($\vartheta \geq 950^{\circ}C$) angestrebt
Materialeinsatz	$m_E \leq 1.04 t/t_{r,p}$
Erwärmung	
bevorzugt	1- oder 2- stufiger
Hubbalkenofen, teilweise	
Stoßofen	
Durchsatz	bis > 180t/h
Herdflächenleistung	> 500 kg/m ² h
Deckenstrahlbrenner	
Luftvorwärmung	$\vartheta_L = 550 \dots 650^{\circ}C$
Thermischer Wirkungsgrad	$\eta_{th} = 0.60 \dots 0.70$
Gesamtwirkungsgrad	$\eta_{ges} = 0.55 \dots 0.65$
Walzung / Abkühlung	
teilweise Abbrennstumpfschweißung zu endloser Ader	
Preßwasserentzunderung mit 250 bar induktive bzw. Durchlauföfen- Nachwärmung verschiebbare dehungsarme kompakte Walzgerüste hydraulische Walzenanstellung der letzten Gerüste Aufteilung der Walzstrecke in mehrere Gruppen 2 .. 4 gerüstige Maßwalzeinheiten kompakte Drahtwalzblöcke Wasserkühlrohre und Ausgleichstrecken zwischen den Walzstaffeln	
Walzgeschwindigkeiten für	
- Draht	bis 150 m/s
- Edeltahldraht	bis 60 m/s
- Stäbe bis	16 (35) m/s
Abmessungsbereich	
- Draht	4.0 bis 20.0 mm Ø
- Stab	8.0 bis 85 mm Ø
- Stab gehaspelt	< 52 mm Ø
Free - Size Walzung	
eingeeengte Toleranzen	$\leq \pm 0.10 \text{ mm f. } < 40 \text{ mm } \varnothing$ $\leq \pm 0.25 \text{ mm f. } > 40 \text{ mm } \varnothing$
Ovalität < 0.6 *Toleranzbreite laufende Geschwindigkeits-Temperatur-, Dicken- und Profilmessung Kühlstrecken für beschleunigte, verzögerte bzw. langsame Abkühlung	

durch eine induktive Nacherwärmung egalisiert werden. Brennstoffbeheizte Tunnelöfen bzw. gut wärmeisolierte Rollgangskanäle eignen sich dafür in gleicher Weise, sind aber entsprechend länger. Während Drähte in klassischer Weise auf Hochleistungswalzstraßen bei Walzgeschwindigkeiten bis 150 m/s 2 ... 3 - adrig gewalzt werden, hat sich für das Walzen von Stabstahl als Anlagentyp die einadrig Walzstraße mit konsequenter HV- Anordnung steifer schnellwechselbarer Gerüste, die aus der Walzachse verschiebbar sind und einen Einzelantrieb haben, bewährt. Als Kalibrierung hat sich die Oval - Rund - Kaliberfolge trotz der etwas geringeren Streckung durchgesetzt, weil in jedem zweiten Gerüst ein Rundprofil entsteht. Merkmal von Walzstraßen der neuesten Generation ist die striktere Unterteilung der Walzstraße in Walzstaffeln und die Einordnung von Kühlstrecken zur Intensivkühlung mit Wasser in Turbulenzkühlrohren und Luftabkühlung zum Temperatenausgleich. Diese sind in ihrer Kühlwirkung so steuerbar, daß unabhängig vom Walzgutquerschnitt die gleiche Temperatur und nahezu das gleiche Temperaturprofil erzielt werden können. Dadurch werden alle thermisch aktivierbaren Gefügeevolutionen in starkem Maße zeit- und ortsabhängig beeinflussbar.

Zur Senkung der Investitionskosten kann bei Rundstranggüß anstelle einer 4 ... 6 - gerüstigen Vorstaffel auch ein Planetenschrägwalzwerk eingesetzt werden, das eine Intensivumformung mit einem Streckgrad bis $\lambda < 3.0$ ermöglicht. Grundbedingung ist jedoch, daß das Vormaterial gut durchgewärmt ist und die Kalibrierung der Kegewalzen sowie der Vorschub- und Achsneigungswinkel auf die Werkstoffbelange abgestimmt sind, weil die Walzparameter unmittelbare ausschlaggebend für die Oberflächenbeschaffenheit und den Grad der Kernverdichtung sind.

Im Bereich der Fertigstaffel kennzeichnet die Einführung einer 2 - gerüstigen Maßwalzeinheit bzw. eines kombinierten 4 - gerüstigen Streck- und Maßwalzblockes den technischen Fortschritt. Es können durch die Umformung mit geringer Abnahme ($\epsilon_A < 10\%$) im Anschluß an die Vorstreckung die Walzguttoleranzen auf kleiner als L DIN verringert werden. Außerdem eröffnete diese Bau- und Kalibrierungsart die Free - Size - Walzung, nach der aus einem gleich großen Ausgangsquerschnitt Rundabmessungen in feinsten Abstufung hergestellt werden können. In Verbindung mit einer hydraulischen Walzenanstellung und einer ständigen Profilmessung wurde erstmals an einer Stabstahlstraße eine automatische Querschnittsregelung (ASC) mit Erfolg verwirklicht [8-9]. In Drahtwalzwerken haben Maßwalzeinheiten vor dem Drahtwalzblock Eingang in die Grundausrüstung gefunden, damit immer ein engtoleriertes Walzgut in den 8 ... 10- gerüstigen Walzblock einläuft. Eine bereits realisierte Weiterentwicklung ist die zusätzliche Aufstellung der Streck- u. Maßwalzeinheit nach dem Walzblock [10]. Dieses Anlagenlayout kommt einem früher vorgeschlagenen Konzept [11] sehr

nahe, das aus Gründen einer zweckmäßigeren thermomechanischen Behandlung eine Unterteilung des Drahtwalzblockes in zwei Gruppen zum Inhalt hatte. Bei einer Hoch- und direkt angeschlossener Niedertemperaturwalzung kann dem unterschiedlichen Verfestigungs- und Rekristallisationsverhalten der Werkstoffe differenzierter und angemessener entsprochen werden, was einer wirkungsvollen Qualitätsbeeinflussung einen größeren Spielraum bietet. Zerstörungsfrei und berührunglos arbeitende Abmessungs-, Geschwindigkeits- und Oberflächenprüfgeräte sind zu wichtigen Bausteinen einer prozeßintegrierten Qualitätskontrolle geworden. Die technischen Erneuerungen im Bereich der Adjustage, die sich in einer weiteren konstruktiven Darchbildung und effektiven Überwachung der maschinellen Einrichtungen ausdrücken, haben den Walzprozeß stabilisiert und die Automatisierung in diesem Abschnitt begünstigt. Ein technisch noch nicht befriedigend gelöstes Problem ist das Schöpfen der Walzader in Drahtstraßen bei den hohen Endwalzgeschwindigkeiten. In [12] wird hierfür die Neukonstruktion einer Schere vorgestellt, die den Anforderungen genügen sollte.

POTENTIAL DER ENERGIEEINSPARUNG

Die Energiekosten sind schon immer ein wesentlicher Teil der Produktionskosten. Es sind jedoch nicht nur wirtschaftliche Beweggründe, die zu einer Minimierung des Energieeinsatzes in jeder Prozeßstufe zwingen, sondern vor allem auch die Aspekte der Umweltbelastung. Schließlich werden bei der Verbrennung von 1 m³ Erdgas etwa 1 m³ Kohlendioxid freigesetzt. CO₂ zählt neben CH₄, das bei ungünstiger Verbrennung der fossilen Brennstoffe auch anfallen kann, zu den 6 Gasen, die den Treibhauseffekt und die bedrohlichen Klimaveränderungen verursachen. Energieeinsparung und Verringerung der Schadstoffemission sind Herausforderungen, die für die metallurgische Industrie höchste Aktualität besitzen. Um den Energieverbrauch senken zu können, ist es unumgänglich, von Zeit zu Zeit die Ursachen und Entstehungsorte von Energieverlusten detailliert zu analysieren.

Der Aufwand an Primärenergie für das Walzen von Stabstahl und Draht konnte durch die Umstellung der Stahlerzeugungsverfahren von 31.7 GJ/t (1980) auf unter 20 GJ/t gerückt werden. Für die Herstellungsrouten "Schrott - E-Ofen - Stranggüß - Walzen" kann er in Abhängigkeit von den örtlichen Verhältnissen und dem Walzstraßentyp bei einem Kalteinsatz der Knüppel mit 6.1 bis 9.0 GJ/t beziffert werden, wovon auf den Schmelzprozeß 3.8 bis 5.5 GJ/t (≈ 350 bis 500 kWh/t Elektroenergie) entfallen. Das Bild 5. widerspiegelt den Energiefluß beim Walzen von Stabstahl und Draht, das auf Messungen an Kontiwalzwerken beruht. Dargestellt ist der reale Energieverbrauch. Für den Ausweis des Primärenergieeinsatzes muß zur Berücksichtigung der Kraftwerksverluste die mechanische

Energie um den Faktor 3 erhöht werden. Bild 5. belegt, daß bei einem Kalteinsatz der Knüppel real mehr als 80 % der Energie auf den Erwärmungsprozeß entfallen. Je nach Durchsatz und Ofenausführung muß zur Erwärmung eine

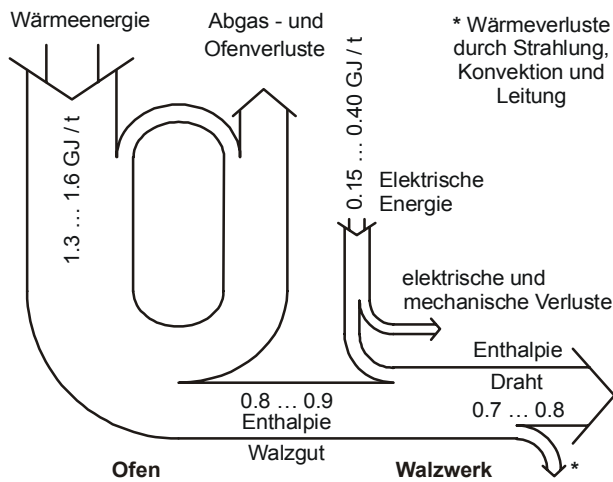


Bild 5. Energieflußbild eines Drahtwalzwerkes
Slika 5. Slika toka energije u valjaonici žice

spezifische Energie von 1.30 bis 1.65 GJ/t aufgebracht werden. Bestwerte um 1.10 GJ/t werden meist nur in eng begrenzten Zeitabschnitten bei vollständiger Kapazitätsausnutzung des Ofens und bei gut funktionierenden Regelsystemen zur örtlichen Dosierung des Energiestromes erzielt. Aufgrund des Verhältnisses von Wärmeenergie zu mechanischer Energie beim Walzen von (4...7): 1 erlangen alle Maßnahmen zur Energieeinsparung beim Erwärmen höchste Priorität. Tabelle 2. gibt einen Überblick über die

Tabelle 2. Effekte verschiedener Maßnahmen zur Energieeinsparung beim Erwärmen von Stahlknü ehn in Hubbalken - oder Stoßöfen
Tablica 2. Efekti različitih mjera štednje energije pri zagrijavanju čeličnih gredica u koračnoj peći ili u potisnoj peći

Kenngröße	Änderung	Energieeinsparung Δq	
		GJ/t	%
Einsatztemperatur ϑ_{wa}	$\vartheta_{wa} \geq 650 \text{ }^\circ\text{C}$ (Warmeinsatz)	0.75 - 0.95	50 - 65
	$\vartheta_{wa} \geq 980 \text{ }^\circ\text{C}$ (Direkteinsatz)	1.00 - 1.20	70 - 83
Erwärmungstemperatur ϑ_{we}	Erniedrigung um 100 K	0.14	9.7
Luftvorwärmtemperatur ϑ_L	Erhöhung um 100 K auf $\vartheta_L = 650 \text{ }^\circ\text{C}$	0.06	4.1
Luftfaktor n	Absenkung um 0.03 auf n = 1.02	0.02	1.4
Ofenwirkungsgrad η_o	Verbesserung $\Delta\eta_o = 0.05$	0.07	4.8

potentiellen Möglichkeiten der Energieeinsparung in diesem Bereich und deren Auswirkungen. Hohe energieökonomische Effekte lassen sich in erster Linie durch

Ausnutzung der Gießwärme erzielen. Der Wärmeinsatz, bei dem die Stranggußknüppel eine zweifache Gefügeumwandlung erfahren, erbringt Energieeinsparungen bis 65 %. Er setzt eine Zwischenlagerung unter unbeheizten wärmeisolierten Abdeckhauben, technische Veränderungen bei den Zufuhrrollgängen und vor allem eine weitgehende organisatorische Abstimmung zwischen dem Stahlwerk und dem Walzwerk voraus. In manchen Werken wird bereits ein Wärmeinsatz bis zu 60 %, bei speziellen Sortimenten sogar bis zu 80 % realisiert. Energetisch noch günstiger erweist sich der Heiß - oder Direkteinsatz, für den die Energieaufwendungen bis zu 83 % geringer sind. Nachteil dieser Einsatzart ist, daß das Gefüge am Ende der Erwärmung immer relativ grob und inhomogen ausfällt, da die Gefügefeinung durch Phasenumwandlung entfällt. Die mittlere Austenitkorngröße kann unter diesen Bedingungen bis zu 3000 μm erreichen, was bei der Walzung zu berücksichtigen ist. Nach Angaben in [13 u. 14] ist diese Technologie erstmals für das Stabstahlwalzen in einem Betonstahlwalzwerk und in einem vollkontinuierlichen Ministahlwerk für Edelstähle zur Anwendung gekommen. Der Herabsetzung der Erwärmungstemperatur, für die pro 100 K Temperaturabsenkung eine annähernd 10 %-ige Energieersparnis angegeben werden kann, sind aus werkstofftechnischer und qualitativer Sicht Grenzen gesetzt. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, und es ist in den qualitätsorientierten Betrieben zur Praxis geworden, die Erwärmungstemperatur nicht ausschließlich nach den Kriterien der Umformbarkeit und der Wärmewirtschaft, sondern in der Hauptsache nach dem Aspekt der Gefügeausbildung festzulegen. Anzustreben ist immer die Temperatur, bei der sich ein homogenes einphasiges feinkörniges Gefüge einstellt, d. h. die Ausscheidungen in Lösung gebracht sind, aber noch kein übermäßiges Kornwachstum erfolgt. Die anderen in Tabelle 2. aufgeführten Maßnahmen betreffen die Abgaswärmeausnutzung, die Verbrennungsführung und die Ofenkonstruktion. Es sind diese Maßnahmen, die in jedem Fall konsequent verfolgt und umgesetzt werden sollten. Energieverringernungen beim Walzen selbst bleiben hinsichtlich ihrer Effektivität vergleichsweise immer gering und können insgesamt nur einen relativ kleinen Beitrag leisten. Wie Bild 6. am Beispiel von Messungen an einem Feinstahlwalzwerk zeigt, ist der elektrische Energieaufwand mehr als doppelt so hoch wie die theoretisch zu verrichtende Umformarbeit.

Das Verhältnis von w_{el} / w_{u-th} pegelt sich nahezu unabhängig von der Abmessung auf $w_{el} / w_{u-th} = 2.12$ ein, was einem Wirkungsgrad von 47 % entspricht. Außer den elektrischen und mechanischen Verlusten im Antriebsstrang, die auch bei Leerlauf aufzubringen sind, verursachen besonders die Reibung und der beim Walzen in den Kalibern erzwungene inhomogene Werkstofffluß die relativ hohen Verluste. Trotz technischer Verbesserungen ist der zur Umformung notwendige Energiebedarf im Laufe der Zeit tatsächlich weiter

angestiegen. Die Ursachen dafür liegen im höheren Grad der Mechanisierung und Automatisierung sowie in dem wachsenden Anteil an Qualitäts- und Edelstählen.

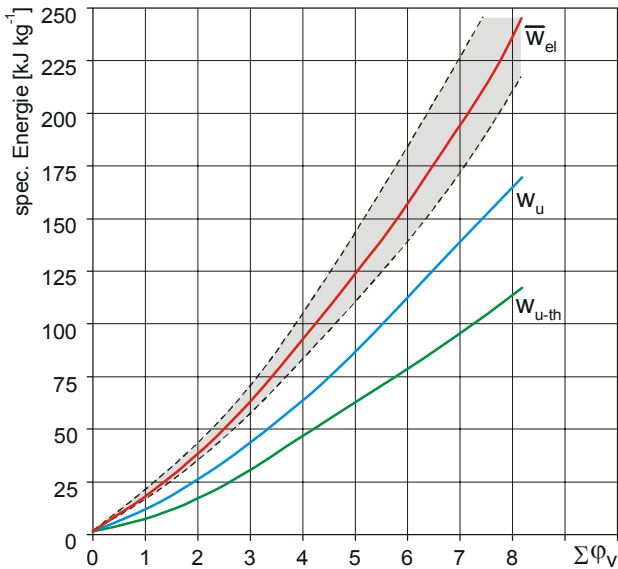


Bild 6. Energieflußbild eines Drahtwalzwerkes
Slika 6. Specifični troškovi za energiju u valjaonicama finog čelika i valjaonicama žice

MAßGENAUES WALZEN

An das Sortiment an Stabstahl und Draht, das aufgrund seiner Eigenschaften und Abmessung direkt seinem Verwendungszweck zugeführt werden kann, werden zunehmend höhere Anforderungen an Durchmesserabstufung sowie an die Maß- und Formgenauigkeit erhoben. Für Betonstähle ist beispielsweise das Walzen im Minustoleranzbereich wirtschaftlich vorteilhaft. Bei Stählen für Verbindungselemente können die Produktionsstufen Ziehen und Glühen vor dem Kaltstauen entfallen, die Arbeitsproduktivität merkbar erhöht und der Werkstoffverlust verringert werden. Für die Stähle, die spangebend weiter verarbeitet werden, verbessert sich der Gebrauchswert bei einer Einschränkung der Unrundheit, da sich die Profilform der gewalzten Drähte bzw. Stäbe in gewisser Weise auf die Fertigprodukte vererbt. Die Maßvorgaben nach DIN 1013 und auch nach ASTM A29 genügen für dieses Produktsegment nicht. Der Markt verlangt immer häufiger die Einhaltung von L DIN und besser mit einer Unrundheit von unter 60 % des Toleranzfeldes. Walztechnisch bedeutet dies, alle technisch und technologisch verursachte Maßschwankungen einzuengen und in der Endstufe des Walzens auszugleichen. Diesen Forderungen kann prinzipiell entsprochen werden durch:

- Verringerung der Stichabnahme in den letzten Stichen auf 4 bis 16 % ($\phi = 0.04 \dots 0.17$);

- Einsatz 2- bis 4-gerüstigen Walzenblöcken mit kompakten, gedrunenen, dehnungsarmen Gerüsten hoher Steifigkeit in Zwei-, Drei- oder Vier-Walzenausführung, die genau reproduzierbar und gegebenenfalls unter Last anstellbar sind;
- Einzelantrieb der Walzscheiben;
- Vorrichtungen zum schnellen Wechsel der Gerüste.

Jedes Walzsystem (Bild 7.) besitzt Spezifika in der Konstruktion und der Kalibrierung. Typischen Vorteilen stehen Nachteile gegenüber. Unterschiede bestehen hinsichtlich des nutzbaren Anstellbereiches beim Free-

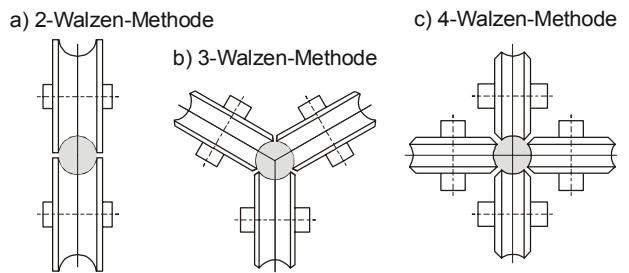


Bild 7. Walzensysteme für das Präzisions- und Free-Size-Walzen
Slika 7. Sistemi valjanja proizvoda preciznih dimenzija i slobodnih dimenzija

Size-Walzen. Zur Einhaltung einer vorgegebenen Unrundheit ist das walzbare Durchmesserpektrum beim Walzen in Kalibern, die von 3 oder gar von 4 Walzen gebildet werden, wegen des stärkeren Formzwanges größer als beim klassischen Duowalzensystem (Bild 8.). Vielfache Anwendung haben Präzisionswalzblöcke in Dreischeibenbauweise mit 3 Eintriebswellen der Firma Kocks [15-17]

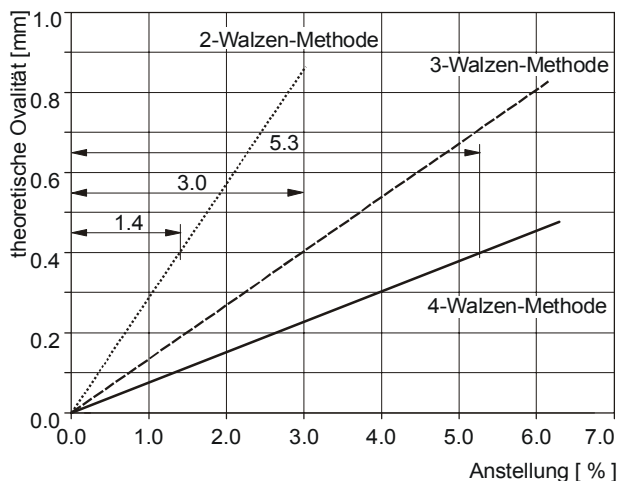


Bild 8. Anstellbereiche der Walzensysteme beim Free-Size-Walzen
Slika 8. Područja podešavanja u sistemu valjanja proizvoda slobodnih dimenzija prema [10]

gefunden, die auch die ganze Entwicklung eingeleitet hat. Mehr als 40 Walzwerke sind mit diesem Blocktyp ausgerüstet. Aber auch Walzblöcke in Duobauart mit dynamischer Querschnittsregelung [8-9, 18-19] und mehrgerüstige 4 - Walzblöcke [7] bzw. kombinierte Walzblöcke mit 2 - und 4 - Walzenkassetten [20] sind in Gebrauch. Der erzielte technische Fortschritt widerspiegelt sich darin, daß bei Rundabmessungen von 4, 5 bis 40 mm \varnothing Maßabweichungen von $< \pm 0.1$ mm bei einer Unrundheit von < 0.12 mm erreicht werden. Toleranzen von weniger als E ... $\frac{1}{6}$ DIN bzw. " ASTM sind gewährleistet; noch engere werden angestrebt. Dies gilt für den gesamten in Frage kommenden Temperaturbereich. Bedingt durch die relativ sehr geringen Streckgrade beim Präzisionswalzen ist der Werkstofffluß sehr inhomogen. Die Umformung findet in der Hauptsache in den oberflächennahen Zonen statt. Dies kann negative Einflüsse auf die Gefügebildung verursachen, da bei diesen Bedingungen die Rekristallisation zu Grobkorn führen kann und das Kornwachstum unter Umständen begünstigt wird. Inwieweit dies zutreffend ist, war Gegenstand spezieller experimenteller Untersuchungen und mathematisch - physikalischer Berechnun-

Tabelle 3. **Walzparameter und Austenitgefügekennwerte beim Walzen mit einer Endumformung in einem 2 - gerüstigen Maßwalzblock (D - Korngröße, X - rek. Anteil)**
 Tablica 3. **Parametri valjanja i koeficijent strukture austenita pri valjanju s jednim deformiranjem na kraju reduktorske blooming valjaonice s dvostrukim valjačkim stanom (D - promjer zrna, X - udio rekristalizacije)**

Abmessung [mm]	v m/s	φ -	φ° 1/s	ϑ °C	K_{wm} / σ_{Fm}	100Cr6				50CrV4			
						Mitte		Rand		Mitte		Rand	
						D μ m	X %	D μ m	X %	D μ m	X %	D μ m	X %
$\varnothing 5.5$	100	0.14	1690	750	1.33	9	93	8	53	12	94	13	63
$\varnothing 8$	60	0.09	660	800	1.24	10	95	9	30	12	94	10	55
$\varnothing 12$	26	0.11	350	800	1.25	11	96	7	40	13	96	11	58
$\varnothing 16$	15	0.10	112	850	1.21	11	97	10	55	13	95	11	68
$\varnothing 20$	10	0.09	65	850	1.21	12	93	9	75	12	97	10	75

gen an ausgewählten Stählen. In Tabelle 3. sind die Ergebnisse für das Walzen der Stähle 100Cr6 und 50CrV4 in einem zweigerüstigen Walzblock zusammengestellt. Durch die mehrmalige Rekristallisation in den Vorstichen bildet sich ein sehr feines Gefüge heraus, das bei allen Abmessungen und somit bei der großen Spannbreite der Umformgeschwindigkeit φ' erhalten bleibt. Besonders in den Randbereichen verläuft die Rekristallisation unvollständig ab. Die Umformverfestigung wird nur durch Erholung teilweise abgebaut. Struktur- und Gefügeanalysen haben diesen Befund auch bei anderen Stählen erhärtet. Prinzipiell läßt sich bei Einhaltung günstiger Endwalztemperaturen ein Mikrogefüge erzielen, das für die nachfolgende Phasenumwandlung beste Voraussetzungen erfüllt.

INTEGRIETE PROZEBMODELLE ZUR STAHL- UND PRODUKTSPEZIFISCHEN THERMOMECHANISCHEN BEHANDLUNG

Unmittelbar nach dem Walzen ist in den Walzgutadern noch eine Energie von 0.7 bis 0.8 GJ/t gespeichert (Bild 5.), die ausreichend ist, direkte eine Wärmebehandlung anzuschließen. Jedoch konnte und kann durch eine einfache Koppelung von Umformung und Wärmebehandlung die Produktqualität nicht nachhaltig verbessert werden. Es genügt diese Verfahrensweise gehobenen Qualitätsansprüchen nicht. Das werkstoffeigene Eigenschaftspotential kann vielmehr, wie hinlänglich bewiesen wurde [21-23] und worauf die moderne Werkstoffforschung aufbaut, nur durch eine werkstoffgerechte und produktspezifisch Thermomechanische Behandlung (TMB) zur Geltung gebracht werden. Das Grundprinzip und das Wesen der TMB besteht in der kontrollierten Beeinflussung der Realstruktur und des Gefüges in allen Phasen der Warmumformung. Durch die chemische Zusammensetzung sind zwar die Werkstoffeigenschaften vorgeprägt; sie werden aber letztlich durch die Struktur- und Gefügemerkmale bestimmt. Im Vergleich zum Walzen von Blechen und Bändern hat die TMB bei der Herstellung von Stabstahl und Draht einen nicht so hohen Anwendungsstand erreicht. Bestehende Entwicklungsdefizite sind allerdings in der letzten Zeit teilweise ausgeglichen worden. Die u. a. in [22, 24-25] angeführten Ergebnisse belegen, daß durch die TMB das Qualitätsniveau gewalzter Stabstähle und Drähte zielgerichtet und rationell verändert werden kann. Sie zeigen aber auch, daß die verfahrenstechnische Nutzung an enge technologische Vorgaben gebunden ist. Die Struktur- und Gefügeveränderungen beim Walzen durch Kornwachstum, Umformverfestigung, dynamische und statische Erholung sowie vor allem Rekristallisation und Ausscheidungsvorgänge sind in hohem Maße vom Umformgrad φ , der Umformgeschwindigkeit φ' , der Umformtemperatur ϑ und der Pausenzeit zwischen den Stichen abhängig. Bezüglich deren Variierbarkeit sind die Freiheitsgrade beim Walzen von Stabstahl und Draht allerdings eingeschränkt, weil durch die Kalibrierung der Umformgrad in jedem Walzstich festliegt und wegen der Einhaltung des Kontinuitätsgesetzes sich Umformgeschwindigkeit, reine Walzzeit und die Pausenzeiten immer nur proportional mit der Endwalzgeschwindigkeit verändern lassen. Als Regelgröße für die Gefügeeolution erlangt in Kontinualzwerken die Temperaturführung während der Erwärmung, der eigentlichen Walzung und der Abkühlung einen hohen Stellenwert. Sie muß ausschließlich auf die Werkstoffbelange abgestimmt sein und genau eingehalten werden, was den Einbau von Kühl- und Ausgleichsstrecken bedingt und hohe Anforderungen an die Sensor-, Meß- und Steuerungstechnik stellt. In Bild 9. sind technologische Konzepte der TMB angeführt, die für das Walzen von

Stabstahl und Draht in Betracht kommen. Sie gewährleisten hochwertige mechanisch - technologische Eigenschaften, machen nachträgliche Wärmebehandlungen teilweise überflüssig und erfordern einen nicht so hohen Legierung-

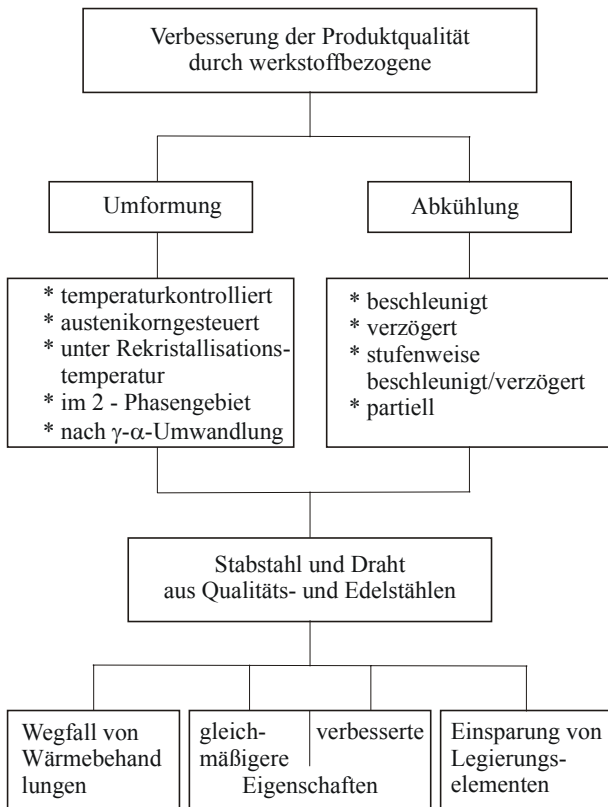


Bild 9. **Technologiekonzepte zur Thermomechanischen Behandlung von Stabstahl und Draht**
 Slika 9. **Tehnološka ideja za termodinamičku obradu šipkastog čelika i žice**

saufwand. In den meisten Fällen müssen Umformung und Temperaturführung auf die Herausbildung eines feinkörnigen, rekristallisierten und gleichmäßigen Austenitgefüges ausgerichtet sein, da dies die Voraussetzung für die Entstehung eines fein- bis superfeindispersen Umwandlungsgefüges ist, das seinerseits günstige Eigenschaftswerte verspricht. Bei einzelnen Stählen ist es vorteilhaft, die Walzung unter Rekristallisationstemperatur, d. h. das thermomechanische Umformen, oder im Zweiphasengebiet [26] bzw. nach der $\gamma-\alpha$ - Umwandlung vorzunehmen. Für die Temperaturführung bei der Abkühlung ist besonders die Abkühlungsgeschwindigkeit im Temperaturbereich zwischen 800 und 500 °C das entscheidende Kriterium für den Verlauf der Phasenumwandlung und die Morphologie des Sekundärgefüges. In Bild 10. sind schematisch potentielle Abkühltechnologien für austenitische, eutektoidische und edriglegierte Stähle mit mittlerem und geringem C- Gehalt veranschaulicht. Diese Darstellung widerspiegelt das ganze Spektrum teclinisch-technologischer auf den

Verarbeitungs-/Verwendungszweck abgestimmter Abkühlungsstrategien. Sie zeigt zugleich, wie wichtig die genaue Temperaturführung bei einer Walzung im Sinne einer thermomechanischen Behandlung ist. Für die Auffindung der zweckmäßigsten technologischen Parameter ist die mathematische Simulation der Prozeßabläufe und der Gefügebildungsvorgänge auf der Basis eines integrierten Prozeßmodells ein unerlässliches Hilfsmittel. Der Gesamtvorgang der Umformung kann in seinen Einzelheiten überschaubar gemacht werden. Kenntnisse über die Wirkungsrichtung und -stärke der Einflußfaktoren sind Gewähr, wirkungsvolle Maßnahmen im Ablauf der Gesamt- und Teilprozesse der Umformung zu planen, einzuleiten, zu optimieren und zu kontrollieren.

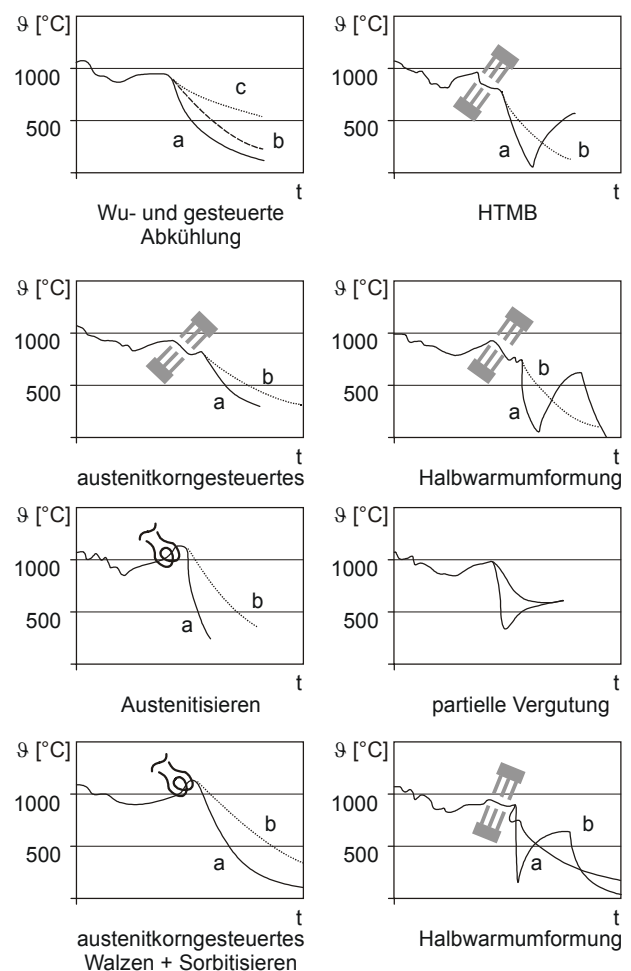


Bild 10. **Walz- und Abkühltechnologien für Stabstahl und Draht**
 Slika 10. **Tehnologije valjanja i hladenja šipkastog željeza i žice**

Die wissenschaftliche Durchdringung der Thermomechanischen Behandlung und der Umformverhältnisse beim Walzen in Kalibern sind traditionell langjährige Forschungsschwerpunkte des Institutes für Metallformung der TU Bergakademie Freiberg. Im Rahmen der entsprec-

henden Forschungsprojekte wurde das integrierte Freiburger Prozeßmodell "Stabstahl - Draht" erarbeitet, das laufend aktualisiert und erweitert wird. Merkmal und Besonderheit dieses Modells gegenüber anderen Modellen ist, daß es für alle Kaliberreihen geeignet ist und für den gesamten technisch relevanten Variationsbereich der technologischen Parameter Gültigkeit besitzt [21]. Das bezieht sich auf die Temperatur - Zeitverläufe, die Spannungs- und Formänderungszustände und die Umformgeschwindigkeit. Da das Institut für Metallformung über eine 4 gerüstige Drahtwalzstaffel verfügt, die großtechnischen Anlagen gleicht und mit modernster Meß- und Steuertechnik ausgerüstet ist, konnten die Gefügeveränderungen lokal für Vergleichsumformgrad bis $\phi = 1.2$, Umformgeschwindigkeiten bis $\dot{\phi} = 2500 \text{ s}^{-1}$ und Temperaturen zwischen $750 < \vartheta < 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ experimentell verfolgt werden [27]. Notwendige Basisdaten konnten vortrefflich gewonnen und die Modelle zu jeder beliebigen Bearbeitungsphase überprüft, angepaßt und verifiziert werden. Das integrierte Prozeßmodell wurde modular strukturiert (Bild 11.). Es umfaßt 3 verfahrensunabhängige Teilmodelle zur Beschreibung des nichtlinearen thermischen und mechanischen Werkstoffverhaltens sowie der Gefüge - Eigenschaftsbeziehung. Diese Teilmodelle stützen sich auf experimentell ermittelten Werkstoffkennwerten ab, die in umfangreichen Datenbanken hinterlegt sind. Beispielsweise sind für den technisch relevanten Bereich das Umformverhalten von mehr als 350 Stählen und die thermophysikalischen Eigenschaften von über 70 Stählen bestimmt und dokumentiert worden. Die Prozeßmodelle beziehen sich auf die 3 Phasen, die das Walzgut beim Walzen durchläuft, und bestehen aus je einer verfahrens- und werkstofftechnischen Komponente. Alle Teilmodelle sind mehrfach mit einander verknüpft, können aber auch für sich getrennt benutzt werden. Das Erwärmungsmodell wurde, um die modernen Nacherwärmungsmethoden zu berücksichtigen, auf die induktive Erwärmung ausgedehnt [28-29]. Das Teilmodell Walzen gestattet, gleichzeitig die Kalibrierung zu entwerfen und alle walztechnischen Kenngrößen zu berechnen [21, 30]. Es enthält Versionen zur alternativen Bestimmung der örtlichen Umformparameter im Raum der Umformzone, in der Querschnittsebene oder in Dickenrichtung mittels der Finite- Elemente - Methode (FEM), bzw. der Finite-Differenzen - Methode (FDM). Das zugehörige Gefügemodell ist auf die Berechnung der mittleren Korngröße und der rekristallisierten Gefügeanteile ausgelegt und gegenwärtig für 15 Stahlwerkstoffe eingeeicht. Das Abkühlungsmodell berücksichtigt die verschiedenen Kühlmethoden zur beschleunigten und verzögerten Abkühlung in ihren Reflexionen auf die Unterkühlbarkeit und die Kinetik der Phasenumwandlung. Für die Gefüge- Eigenschaftsbeziehungen sind statistisch gesicherte experimentell ermittelte mathematische Funktionen zur Anwendung gekommen, die sich nach Art, Zahl und Menge der Grobphasen für die

einzelnen Gefügestände unterscheiden. Alle wichtigen Berechnungsergebnisse können abgerufen, tabellarisch bzw. grafisch dargestellt werden, so daß ein vollständiger Überblick über den Walzprozeß und das Qualitätsniveau

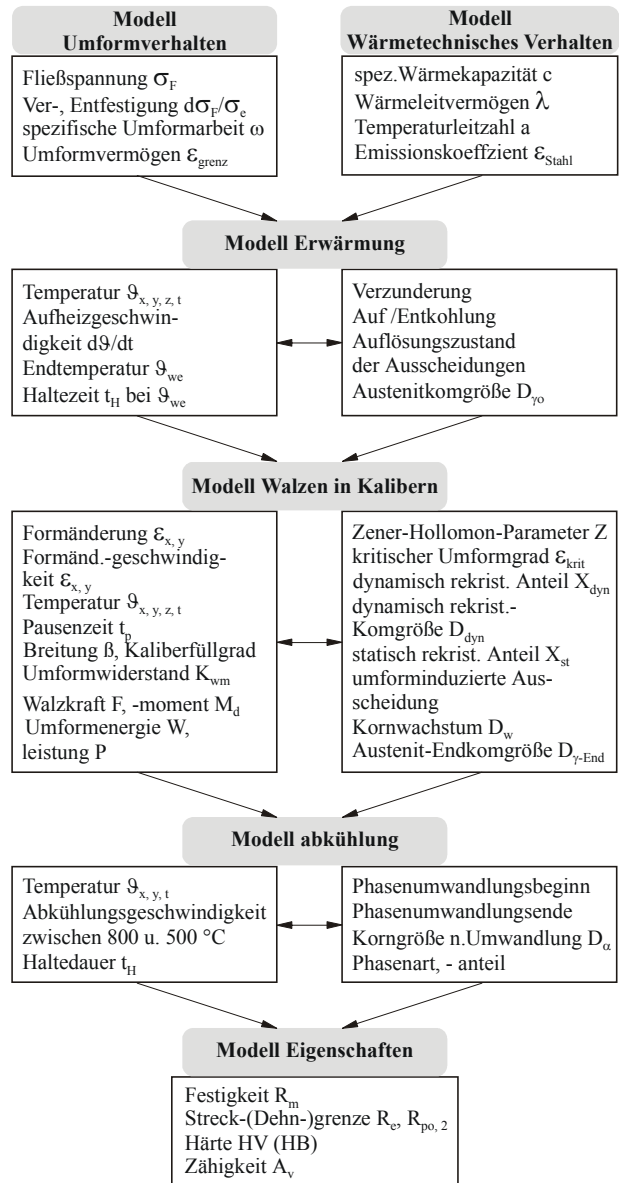


Bild 11. Integriertes Prozeßmodell für das Walzen von Stabstahl und Draht

Slika 11. Integrirani model procesa za valjanje šipkastog čelika i žice

erhalten wird. Die verschiedenartigsten technologischen TMB- Konzepte können direkt nachgestellt und umfassend hinsichtlich ihrer Prozeßsicherheit und Qualitätszuverlässigkeit bewertet werden. Die computergestützte Prozeßführung wird durch das integrierte Prozeß-Gefüge-Modell auf eine solche Basis gestellt, die die Durchsetzung von Fortschrittstechnologien überhaupt erst ermöglicht.

LITERATUR

1. H. Weise, u. a.: Stahl und Eisen 116 (1996) 11, 121-126
2. B. Steffes, u. a.: Stahl und Eisen 119 (1999) 5, 95-99
3. D. Thiery, u. a.: Stahl und Eisen 117 (1997) 8, 79-89
4. H. Rzepczyk, u. a.: Stahl und Eisen 117 (1998) 9, 85-91
5. E. Wulfineier, u. a.: Stahl und Eisen 120 (2000) 2, 77-85
6. G. Matsuo, u. a.: Iron and Steel Eng. (1999) 3, 27-30
7. M. Lestani, u. a.: Iron and Steel Eng. (1999) 3, 31-34
8. H. Müller, O. Palzer: Stahl und Eisen 119 (1999) 3, 49-56
9. O. Palzer, A. Körmer: Kalibreur 62 (2001), 49-62
10. T. Sakurai, u. a.: Stahl und Eisen 121 (2001) 6, 67-71
11. W. Lehnert, u. a.: W-Patent B21B/2435332
12. SKET Walzwerkstechnik GmbH: Stahl und Eisen 199 (1999) 3, 3
13. P. Greis, R. Stein-Versen: Stahl und Eisen 121 (2001) 4, 89-85
14. F. Alzetta, u. a.: MPT Intern 24 (2001) 1, 72-82
15. W. J. Ammerling, u. a.: Stahl und Eisen 121 (2001) 2, 51-57
16. W. J. Ammerling: AISE Steel Technology (2001) 3, 41-44
17. P. Wolkowicz, u. a.: Stahl und Eisen 119 (1999) 1, 39-43
18. H. J. Müller, D. Budde: AISE Steel Technology (2000) 9, 46-51
19. J. D. Foley, D. S. Goldsmith: Iron and Steel Eng. (1999) 4, 48-50
20. O. Hein, R. Fabris: AISE Steel Technology (2000) 9, 41-43
21. W. Lehnert, u. a.: Stahl und Eisen 118 (1998) 3, 53-60
22. W. Brahmman, u. a.: Stahl und Eisen 117 (1997) 3, 59-66
23. H. P. Hougardy, u. a.: Stahl und Eisen 116 (1996) 4, 109-113
24. J. Ball, u. a.: Stahl und Eisen 117 (1997) 4, 59-67
25. W. Bleck, u. a.: Stahl und Eisen 117 (1997) 4, 39-46
26. L. Chabbi: "Thermomechanische Behandlung von Stählen im 2 - Phasengebiet" Freiburger Forschungshefte B 315 (2001)
27. W. Lehnert, u. a.: Steel research 66 (1995) 11, 470-475
28. Y. Dai, u. a.: Elektrowärme international B 1 (1997), B21-27
29. Y. Dai, Dr.-Ing.-Dissertation, TU Bergakademie Freiberg 1998, Freiburger Forschungshefte B 284 (1998)
30. B. Schmidt: Dr.-Ing.-Dissertation, TU Bergakademie Freiberg 1996, Freiburger Forschungshefte B 282 (1997)