

# INHALTSVERZEICHNIS

1	Einführung zur Technik des Stranggießens von Stahl .....	1
	Von K. Rüttiger, A. Diener und K. Wagner	
1.1	Forderungen an moderne Stranggießanlagen .....	2
1.2	Anlagenarten .....	5
1.3	Anlagenteile .....	7
1.3.1	Kokille .....	12
1.3.1.1	Kokillenwerkstoff .....	14
1.3.1.2	Oberflächenbeschichtung .....	15
1.3.1.3	Konizität .....	15
1.3.1.4	Oszillation .....	19
1.3.2	Strangstützung direkt unterhalb der Kokille .....	19
1.3.3	Strangstützrollen .....	21
1.3.4	Sekundärkühlung .....	26
1.4	Steuerung und Automation .....	30
1.5	Sonderverfahren .....	32
1.6	Ausblick .....	33
	Literaturverzeichnis .....	34
2	Allgemeine Grundlagen der Erstarrung .....	35
2.1	Erstarrung von Metallen .....	35
	Von F. Oeters	
2.1.1	Einleitung .....	35
2.1.2	Thermodynamische Grundlagen .....	35
2.1.3	Keimbildung und Kristallwachstum .....	38
2.1.4	Erstarrung mit glatter Front .....	47
2.1.5	Konstitutionelle Unterkühlung .....	56
2.1.6	Erstarrung mit heterogener Schicht .....	61
2.2	Erstarrungsgefüge: Zellen und Dendriten .....	68
	Von W. Kurz und D. J. Fisher	
2.2.1	Erzwungenes oder freies Wachstum .....	68
2.2.2	Morphologie und Kristallografie von Dendriten .....	70
2.2.3	Diffusionsfeld in der Umgebung der Spitze eines nadelförmigen Kristalls .....	75
2.2.4	Betriebspunkt der Spitze .....	77
2.2.5	Primärer Abstand von Dendriten bei erzwungenem Wachstum .....	83

2.2.6	Sekundäre Armabstände bei gerichtetem oder ungerichtet globulitischem Wachstum .....	86
2.3	Berechnung des Erstarrungsvorgangs und der Wärmeübertragung beim Strangguß .....	91
	Von R. Jeschar und E. Specht	
2.3.1	Einleitung .....	91
2.3.2	Qualitative Beschreibung des Erstarrungsvorgangs .....	92
2.3.3	Berechnung von Erstarrungsvorgängen .....	93
2.3.3.1	Allgemeingültige Beschreibung .....	93
2.3.3.2	Analytische Lösung bei quasistationären Temperaturprofilen .....	101
2.3.3.3	Analytische Lösung bei konstanter Oberflächentemperatur .....	102
2.3.3.4	Näherungslösung .....	104
2.3.3.5	Einfluß der Schmelzüberhitzung .....	106
2.3.4	Erstarrungsverlauf beim Strangguß .....	108
2.3.4.1	Primärkühlzone .....	108
2.3.4.2	Sekundärkühlzone .....	111
2.3.4.3	Tertiärkühlzone .....	113
2.3.5	Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten .....	114
2.3.6	Beispiel eines Erstarrungsverlaufs .....	121
2.4	Mikroseigerung und Einschlufbildung bei der Erstarrung .....	125
	Von H. Jacobi	
2.4.1	Einleitung .....	125
2.4.2	Erstarrungsstruktur .....	125
2.4.2.1	Stationär gerichtete dendritische Erstarrung .....	126
	Morphologie dendritischer Kristalle – Armabstände dendritischer Kristalle – Umkehr der natürlichen Erstarrung – Dendritische Primärkorngrenzen – Umlösung sekundärer Arme	
2.4.2.2	Ungerichtete globulitische Erstarrung .....	138
	Anisotropie des Kristallwachstums – Bildung und Sedimentation freier Kristalle – Struktur globulitischer Schüttungen	
2.4.3	Bildung von Mikroseigerungen .....	143
2.4.3.1	Ursache und Nachweis .....	143
	Konzentrationsanreicherung während der Erstarrung – Mikro- sonden-Konzentrationsprofile	
2.4.3.2	Theoretische Berechnung .....	148
	Seigerungsmodell für heterogene Schicht – Einfluß von Zeit und Dendritenabstand – Interdendritische Anreicherung von Mn, C und O	

2.4.3.3	Mikroseigerung in technischen Gußblöcken .....	153
	Seigerungsverhältnis von Cr und Mn, Einfluß des Kohlenstoff- gehalts – Einfluß von Erstarrungsgefüge und Lage im Block	
2.4.3.4	Abbau der Mikroseigerung durch Homogenisierung .....	155
	Einfluß von Temperatur und Zeit – Berechnung der Homogenisierung	
2.4.4	Bildung von Einschlüssen .....	161
2.4.4.1	Bildung von Sulfideinschlüssen .....	161
	Interdendritische Ausscheidung – Sulfidzusammensetzung	
2.4.4.2	Sulfidgröße und Anzahl in Blockguß .....	165
	Einfluß des Schwefelgehalts – Einfluß der örtlichen Abkühl- geschwindigkeit	
2.4.4.3	Teilchengröße und Menge in Strangguß .....	166
	Sulfide in niedriglegiertem Stahl – Delta-Ferrit in austenitischem Stahl	
2.4.5	Schlußfolgerung .....	169
2.5	Bildung von Makroseigerungen .....	171
	Von K. Schwerdtfeger	
2.5.1	Einleitung .....	171
2.5.2	Konzentrationsanreicherung vor einer planaren Erstarrungs- front, „Zonenschmelzseigerung“ .....	171
2.5.3	Ausbildung heterogener Schichten bei der technischen Erstar- rung von Stahl .....	176
2.5.4	Diffusionsseigerung bei Gegenwart einer heterogenen Schicht .....	179
2.5.5	Normale Saugseigerung .....	180
2.5.5.1	Inverse Seigerung .....	182
2.5.5.2	Mittenseigerung .....	185
2.5.5.3	Seigerung am Übergang zwischen Block und isoliertem Block- kopf .....	187
2.5.5.4	Mitte beim Strangguß .....	187
2.5.6	Seigerungen bei Lunkerbildung .....	190
2.5.7	Seigerungen durch Verformungen der festen Strangschale .....	193
2.5.8	Sedimentationsseigerung .....	196
2.5.9	A- und V-Seigerungen .....	199
	Literaturverzeichnis .....	203
3	Stranggießen von Stahl .....	211
3.1	Kontrolle des oxidischen Reinheitsgrads .....	211
	Von W. Pluschkell	

3.1.1	Prüfungsmethoden .....	212
3.1.2	Strömung in der Stranggießkokille und im Schmelzensumpf .....	214
3.1.3	Strömung im Zwischenbehälter .....	218
3.1.4	Gießstrahlen .....	222
3.1.5	Verdecktes Gießen zwischen Pfanne und Verteiler .....	225
3.1.6	Verbesserung des Reinheitsgrads durch Pfannenspülprozesse .....	226
3.1.7	Stadien der Fälldesoxidation .....	228
3.1.8	Anmerkungen zu Feuerfestproblemen .....	231
3.2	Eigenschaften und Aufgaben von Stranggießschlacken .....	233
	Von P. Riboud	
3.2.1	Einleitung .....	233
3.2.2	Zusammensetzung der gebräuchlichen Gießpulver .....	233
3.2.2.1	Chemische Zusammensetzung .....	233
3.2.2.2	Mineralogische Zusammensetzung .....	234
3.2.2.3	Granulierte Produkte .....	234
3.2.3	Physikalische Eigenschaften des Gießpulvers und flüssiger Schlacke .....	236
3.2.3.1	Enthalpie-Temperaturkurven .....	236
3.2.3.2	Liquidustemperaturen .....	236
3.2.3.3	Viskosität .....	236
3.2.3.4	Metall-Schlacke-Grenzflächenspannung .....	238
3.2.3.5	Wärmeübergangseigenschaften .....	239
	Infiltrierte Schichten – Schichten an der freien Oberfläche	
3.2.3.6	Verhalten der Pulver im Anlieferungszustand .....	240
	Untersuchung im Erhitzungsmikroskop – Simulation des Schmelzens	
3.2.4	Verhalten des Gießpulvers in der Kokille .....	242
3.2.4.1	Überblick über das Verhalten von Metall und Gießschlacke .....	242
	Verhalten des Metalls im Meniskus – Verhalten des Gießpulvers	
3.2.4.2	Gießpulver- und Schlackeverhalten an der Oberfläche .....	243
	Beobachtung und Messung der Schichten – Schlackenverbrauch – Schlackendicke an der freien Oberfläche; Einfluß der Gießbedingungen und der Schlackeneigenschaften – Wärmeentzug durch die Schlacke im Meniskus – Verhalten der Schlacke im industriellen Betrieb	
3.2.4.3	Schlackeninfiltration im Meniskus .....	248
	Mechanismus der Flüssig-Infiltration – Bedingungen für die Zuführung der Schlacke im Meniskus – Schlackenrandbildung	
3.2.4.4	Schlackenschmierung im Spalt .....	250
3.2.5	Aufgaben der Gießpulverschlacken .....	251

3.2.5.1	Schutz gegen Oxidation .....	251
3.2.5.2	Wärmeisolierung der freien Stahloberfläche .....	251
3.2.5.3	Absorption und Auflösung von Einschlüssen .....	252
3.2.5.4	Einfluß der Schlackeneigenschaften auf die Schmierung .....	253
3.2.5.5	Einfluß der Schlacke auf den Wärmeübergang; Einwirkung von Gießspiegelstörungen .....	253
	Einwirkung von Wellen auf den Meniskus	
3.2.6	Schlußfolgerung .....	255
3.3	Erstarrungsgeschwindigkeit beim Strangguß .....	256
	Von M. M. Wolf	
3.3.1	Einleitung .....	256
3.3.2	Erstarrung in der Kokille .....	262
	Gesamtwärmeabfuhr – Lokale Wärmeabfuhr – Schalenbildung	
3.3.3	Sekundärkühlung .....	279
	Wärmeübergang – Schalenwachstum – Wärmebehandlung	
3.3.4	„Tertiäre“ Kühlung .....	297
3.3.5	Ausblick .....	298
3.4	Erstarrungsgefüge und Seigerungen in stranggegossenem Stahl .....	301
	Von K. Wünnenberg und H. Jacobi	
3.4.1	Einleitung .....	301
3.4.2	Grundlagen der Erstarrungsgefüge .....	301
3.4.2.1	Gefügetypen .....	301
3.4.2.2	Entstehung globulitischer Gefüge .....	302
3.4.2.3	Beeinflussung der Erstarrungsmorphologie .....	304
3.4.2.4	Ausdehnung der heterogenen Zone im Strangguß .....	311
3.4.3	Erstarrungsgefüge im Strangguß .....	313
3.4.3.1	Kernerstarrung und Lunkerung in Knüppeln .....	313
3.4.3.2	Mittenerstarrung von Brammen .....	316
3.4.4	Seigerungserscheinungen im Strangguß .....	321
3.4.4.1	Axiale Kernseigerung bei Knüppeln .....	321
3.4.4.2	Mittenseigerung bei Brammen .....	325
3.4.4.3	Sedimentationsseigerung bei Knüppeln und Brammen .....	332
3.4.4.4	Seigerung gerührter Stränge .....	333
3.4.5	Schlußfolgerung .....	336
3.5	Spezielle Gesichtspunkte beim Stranggießen höherlegierter Stähle .....	339
	Von H.-U. Lindenberg	
3.5.1	Einleitung .....	339

3.5.2	Grundsätze des Stranggießens höherlegierter Stähle .....	340
3.5.3	Untersuchungs- und Betriebsergebnisse .....	341
3.6	Mechanische Vorgänge beim Stranggießen .....	358
	Von K.-H. Tacke	
3.6.1	Werkstoffverhalten bei Stranggießtemperaturen .....	358
3.6.2	Methoden zur Modellentwicklung .....	360
3.6.2.1	Methode der Finiten Elemente .....	360
3.6.2.2	Elementare Biegetheorie .....	360
3.6.3	Ausbauchung .....	361
3.6.3.1	FEM-Rechnungen .....	361
3.6.3.2	Biegemodelle .....	362
3.6.3.3	Näherungsausdrücke für Kenngrößen der Ausbauchung .....	362
3.6.4	Strangrichten .....	365
3.6.4.1	Biegemodelle für das Richten .....	366
3.6.4.2	Näherungsausdrücke für das Richten .....	368
3.6.4.3	Richten von Brammen mit flüssigem Kern .....	368
3.6.5	Thermische Spannungen und Schrumpfung .....	369
3.6.5.1	FEM-Rechnungen .....	369
3.6.5.2	Schrumpfung in Rundkokillen .....	369
3.7	Verformungen und Rißbildungen in stranggegossenem Stahl .....	370
	Von K. Wünnenberg und R. Flender	
3.7.1	Einleitung .....	370
3.7.2	Werkstoffverhalten bei hohen Temperaturen .....	370
3.7.2.1	Einfluß der Stahlzusammensetzung .....	371
3.7.2.2	Einfluß der Verformungsgeschwindigkeit .....	373
3.7.2.3	Temperaturverteilung in der erstarrten Schicht .....	373
3.7.3	Ursachen der Rißbildung und Maßnahmen zu deren Vermeidung .....	375
3.7.3.1	Oberflächenrisse .....	375
	Rißbildung in der Kokille – Rißbildung in der Sekundärkühlzone	
3.7.3.2	Innenrisse .....	383
	Längsrißbildung in der Kokille – Querrißbildung in der Strangführung	
3.7.4	Bildung und Erscheinungsform von Innenrissen .....	395
3.7.4.1	Verlauf und Ausbreitung der Risse im Primärgefüge .....	395
3.7.4.2	Seigerung und Mikrohärtigkeit in ausgeheilten Innenrissen .....	397
3.7.5	Schlußfolgerung .....	400
3.8	Auslegung und Verhalten von Stranggießrollen .....	402
	Von A. Diener und K. Rüttiger	

3.8.1	Aufgaben der Rollen .....	402
3.8.2	Mechanische Beanspruchung der Rollen .....	402
3.8.2.1	Ferrostatischer Druck .....	402
3.8.2.2	Biegebelastung .....	404
3.8.2.3	Kontakt zwischen Rollen und Strang .....	412
3.8.3	Thermische Beanspruchung der Rollen .....	414
3.8.4	Die durch die thermischen und mechanischen Wechsellspannungen verursachte Rißausbreitung .....	421
3.8.5	Verschleiß der Rollen .....	424
3.8.6	Rollentypen .....	426
3.8.7	Rollenwerkstoffe .....	428
	Literaturverzeichnis .....	430
4	Elektromagnetisches Rühren beim Stranggießen .....	449
4.1	Physikalische Grundlagen .....	449
	Von M. Dubke	
4.1.1	Einleitung .....	449
4.1.2	Elektrodynamische Grundlagen .....	449
4.1.2.1	Lorentzkraft .....	449
4.1.2.2	Bauformen von Induktoren .....	451
4.1.2.3	Leerlaufeld der Induktoren .....	453
4.1.2.4	Kraftfeld der Induktoren .....	456
	Strömungen beim linearen Rühren – Strömungen beim Drehfeldrühren – Möglichkeiten und Grenzen mathematischer Strömungsmodelle	
4.1.2.5	Luftschicht oder Kupferkokille zwischen Induktor und Strang .....	461
4.1.3	Rührströmungen .....	462
4.1.3.1	Grundlagen der Strömungslehre .....	462
4.1.3.2	Berechnung von Rührströmungen .....	464
	Kraftfeld eines Linearinduktors unmittelbar vor dem Strang – Kraftfeld eines Drehfeldrührers	
4.1.4	Andere Möglichkeiten der elektromagnetischen Strömungsbeein- flussung .....	469
4.1.4.1	Konduktives Rühren .....	469
4.1.4.2	Elektromagnetische Bremse .....	470
4.1.4.3	Elektromagnetische Kokille .....	471
4.2	Technik und metallurgische Ergebnisse .....	472
	Von R. Jauch	
4.2.1	Einleitung .....	472

4.2.2	Rühreinrichtungen .....	473
4.2.2.1	Induktive Rührer .....	473
4.2.2.2	Konduktive Rührer .....	478
4.2.2.3	Elektromagnetische Bremse .....	482
4.2.2.4	Zusammenstellung von Rührerdaten .....	483
4.2.3	Rühren beim Stranggießen von Knüppeln und Vorblöcken .....	484
4.2.3.1	Oberfläche .....	484
4.2.3.2	Reinheitsgrad .....	491
	Kokillenrühren ohne Tauchrohr – Kokillenrühren mit Tauchrohr – Rühren dicht unter der Kokille .....	
4.2.3.3	Seigerung .....	494
	Vorblockstrangguß - Knüppelstrangguß .....	
4.2.4	Rühren beim Stranggießen von Brammen .....	510
4.2.4.1	Rühren in S-Position .....	511
	Erstarrungsstruktur ohne Rühren – Erstarrungsstruktur mit Rühren – Einfluß des Rührens auf Seigerung, Reinheitsgrad und Werkstoffeigenschaften .....	
4.2.4.2	Rühren in der Kokille .....	521
	Netinel-Rührer des Irsid – NSC-Rührer – Elektromagnetische Bremse .....	
4.2.5	Schlußfolgerung .....	522
	Literaturverzeichnis .....	526
5	Prozeßkontrolle und Automatisierung beim Stranggießen .....	533
5.1	Allgemeine Aspekte der Prozeßkontrolle .....	533
	Von K.-H. Spitzer .....	
5.1.1	Einleitung .....	533
5.1.2	Funktionsebenen .....	533
5.1.2.1	Allgemeine Koordinierungsfunktionen für den gesamten Stahlwerksbereich (Ebene 1) .....	533
5.1.2.2	Übergeordnete Überwachungsfunktionen im Stranggußbereich (Ebene 2) .....	535
	Produktionsplanung – Zentrale Datenverwaltung – Materialverfolgung – Prozeßverfolgung – Anlagenüberwachung – Qualitätsüberwachung – „Off-line“-Funktionen .....	
5.1.2.3	Überwachung und Steuerung von Teilprozessen (Ebene 3) .....	539
	Gießspiegelregelung – Automatische Gießpulverzugabe – Automatische Kokillenbreitenverstellung – Sekundärkühlung – Gießgeschwindigkeitsregelung .....	
5.1.2.4	Meßtechnik (Ebene 4) .....	541



5.1.3	Informationsverarbeitung .....	541
5.1.3.1	Planungsalgorithmen .....	542
5.1.3.2	Statistische Modelle .....	542
5.1.3.3	Physikalische Modelle .....	542
5.1.3.4	Steuerprozeduren .....	544
5.1.3.5	Expertensysteme .....	545
5.1.4	Hardwarekonfigurationen .....	546
5.1.5	Mögliche Entwicklungsrichtungen .....	549
5.2	Beispiele für Regelung und Automatisierung .....	550
	Von A. Etienne	
5.2.1	Automatisierte Gießtechniken .....	550
5.2.1.1	Füllstandsregelung in Tundish und Kokille .....	550
5.2.1.2	Automatische Pulverzugabe .....	553
5.2.2	Durchbruch-Warnsystem .....	554
5.2.3	Sekundärkühlwasser-Regelung .....	555
5.2.3.1	Produktqualität .....	555
5.2.3.2	Dynamische Regelung .....	555
5.2.3.3	Beispiel eines Regelungsalgorithmus .....	558
5.2.3.4	Messung der Oberflächentemperatur .....	561
5.2.3.5	Überprüfung der Spritzbedingungen .....	564
5.2.3.6	Länge des flüssigen Sumpfes .....	565
5.2.4	Verfolgung und Überwachung der Brammen .....	565
5.2.4.1	Qualitätssicherung .....	565
5.2.4.2	Längenoptimierung .....	567
5.2.4.3	Automatische Handhabung .....	567
5.2.5	Schlußfolgerung .....	568
	Literaturverzeichnis .....	568
6	Spezielle Erstarrungsprozesse .....	571
6.1	Horizontalstranggießen .....	571
	Von P. Stadler	
6.1.1	Einleitung .....	571
6.1.2	Verfahren nach General Motors .....	573
6.1.2.1	Mechanismus der Strangschalenbildung .....	574
6.1.2.2	Entwicklung am Beispiel der Boschgotthardshütte .....	575
	Abreißring – Kokille – Ausziehmaschine – Verfahrensablauf –	
	Heißeinsatz – Ausbringen – Innengefüge – Reinheitsgrad –	
	Oberflächen- und Innenrisse	

6.1.3	Schlußfolgerung	588
6.2	Endabmessungsnahe Herstellung von Flachprodukten .....	589
	Von W. Reichelt, W. Kapellner und R. Steffen	
6.2.1	Einleitung .....	589
6.2.2	Definitionen .....	590
6.2.3	Metallurgische Gesichtspunkte .....	590
6.2.4	Überblick über verfahrenstechnische Aktivitäten .....	594
6.2.4.1	Stationäre Kokille .....	594
6.2.4.2	Mitlaufende Kokille .....	596
6.2.5	Allgemeine Verfahrensfragen .....	597
6.2.6	Aspekte der Weiterverarbeitung .....	599
6.2.6.1	Gefüge .....	600
6.2.6.2	Umformgrad .....	602
6.2.7	Anlagenkonzepte .....	602
6.2.8	Schlußfolgerung .....	604
6.3	Rasche Erstarrung von Schmelzen .....	605
	Von G. Frommeyer und E. Vogt	
6.3.1	Einleitung .....	605
6.3.2	Rasche Erstarrung und endabmessungsnahe Gießen von Bändern mittels Meltspinverfahrens .....	605
6.3.2.1	Mechanismen der Bandentstehung .....	605
6.3.2.2	Keimbildungs- und Kristallisationskinetik rasch erstarrter glasiger Legierungen .....	608
6.3.2.3	Wärmeübergang und Erstarrung kristalliner Fe-Si- und Fe-C- Legierungen .....	612
6.3.2.4	Korrelationen zwischen Mikrostrukturen und Abkühlraten rasch erstarrter Legierungen .....	616
6.3.2.5	Schlußfolgerung .....	619
6.3.3	Die rasche Erstarrung flüssiger Metallstrahlen zu Fasern und Drähten .....	620
6.3.3.1	Die Strahlstabilisierung beim Ausfluß einer metallischen Schmelze aus einer Rundlochdüse .....	620
6.3.3.2	Das In-rotating-liquid-spinning (Inrolisp-Verfahren) .....	623
	Verfahrensprinzip – Prozeßparameter – Herstellung und Eigen- schaften von Drähten aus glasigen Legierungen – Verfahrens- parameter und Eigenschaften rasch erstarrter kristalliner Mikrodrähte	

---

6.3.4	Die Schmelzatomisation zur Erzeugung rasch erstarrter Legierungspulver .....	628
6.3.4.1	Prozeßablauf und Kinetik der Inertgasschmelzatomisation .....	628
6.3.4.2	Mikrostrukturen und Eigenschaften rasch erstarrter eutektischer Fe-C- und Fe-B-Pulverteilchen und konsolidierter Legierungen .....	631
6.3.4.3	Schlußfolgerung .....	633
	Literaturverzeichnis .....	634
	Sachverzeichnis .....	640