

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	Erstarringsgefüge: 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 Einschlußbildung 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 Kohlenstoffgehalts – 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 Abkühlgeschwindigkeit	
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 Erstarrungsfront, „Zonenschmelzseigerung“	171
2.5.3	Ausbildung heterogener Schichten bei der technischen Erstarrung von Stahl	176
2.5.4	Diffusionsseigerung bei Gegenwart einer heterogenen Schicht	179
2.5.5	Normale Saugseigerung	180
2.5.5.1	Invers Seigerung	182
2.5.5.2	Mittenseigerung	185
2.5.5.3	Seigerung am Übergang zwischen Block und isoliertem Blockkopf	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
3.2.5.6	Einwirkung von Wellen auf den Meniskus	253
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
	Gesamtwärmeverlust – 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	Seigerungerscheinungen 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 Rißbildung in stranggegossenem Stahl	370
	Von K. Wünnenberg und R. Flender	
3.7.1	Einleitung	370
3.7.2	Werkstoffverhalten bei hoher 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 erstarnten 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 Mikrohärte 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	Ferrostaticcher 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 Wechselspannungen verursachte Rißausbreitung	421
3.8.5	Verschleiß der Rollen	424
3.8.6	Rollentypen	426
3.8.7	Rollenwerkstoffe	428
	Literaturverzeichnis	430
4	Elektromagnetisches Röhren 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	Leerlauffeld der Induktoren	453
4.1.2.4	Kraftfeld der Induktoren	456
	Strömungen beim linearen Röhren – Strömungen beim Drehfeldröhren – 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 Strömungsbeeinflussung	469
4.1.4.1	Konduktives Röhren	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	Röhren beim Stranggießen von Knüppeln und Vorblöcken	484
4.2.3.1	Oberfläche	484
4.2.3.2	Reinheitsgrad	491
	Kokillenröhren ohne Tauchrohr – Kokillenröhren mit Tauch- rohr – Röhren dicht unter der Kokille	
4.2.3.3	Seigerung	494
	Vorblockstrangguß - Knüppelstrangguß	
4.2.4	Röhren beim Stranggießen von Brammen	510
4.2.4.1	Röhren in S-Position	511
	Erstarrungsstruktur ohne Röhren – Erstarrungsstruktur mit Röhren – Einfluß des Röhrens auf Seigerung, Reinheitsgrad und Werkstoffeigenschaften	
4.2.4.2	Röhren 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 Stahl- werksbereich (Ebene 1)	533
5.1.2.2	Übergeordnete Überwachungsfunktionen im Stranggußbereich (Ebene 2)	535
	Produktionsplanung – Zentrale Datenverwaltung – Material- verfolgung – Prozeßverfolgung – Anlagenüberwachung – Qua- litätsüberwachung – „Off-line“-Funktionen	
5.1.2.3	Überwachung und Steuerung von Teilprozessen (Ebene 3)	539
	Gießspiegelregelung – Automatische Gießpulverzugabe – Auto- matische 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 Erststellungsprozesse	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 –	
	Heißbeinsatz – 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 Meltpinverfahrens	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	Wärmetübergang 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