Karl J. Thomé-Kozmiensky Andrea Versteyl

Schlacken aus der Metallurgie

– Rohstoffpotential und Recycling –



TK

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Schlacken aus der Metallurgie – Rohstoffpotential und Recycling –
Karl J. Thomé-Kozmiensky, Andrea Versteyl.
– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011
ISBN 978-3-935317-71-9

ISBN 978-3-935317-71-9 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2011
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Erfassung und Layout: Nicole Bäker, Janin Burbott, Petra Dittmann, Sandra Peters
Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Inhaltsverzeichnis

Strategie und Recht

Stoffströme in der industriellen Kreislaufwirtschaft
Martin Faulstich und Mario Mocker 3

Zukünftige rechtliche Rahmenbedingungen für die Verwertung mineralischer Abfälle
Jörg Demmich 25

Vollzugserfahrungen mit der Verwertung von Schlacken im Straßen- und Erdbau in Nordrhein-Westfalen
Christel Wies 43

Partizipation durch Verfahren – Verbesserung der Öffentlichkeitsbeteiligung auf Grundlage der gesetzlichen Regelungen –
Andrea Versteyl 51

Technologie und Ökologie

Die Lech-Stahlwerke in Bayern – ein modernes Elektrostahlwerk und seine Schlackenmetallurgie
Hans Peter Markus, Hartmut Hofmeister und Michael Heußen 67

Aufbereitung und Verwertung von Elektroofenschlacke
Georg Geißler, Alexandra Ciocea und Anna Mooser 91

Technische Möglichkeiten der Rückgewinnung – Bedarfsgerechte Herstellung von Produkten aus Eisenhüttenschlacken –
Klaus Kesseler, Jutta Möller und Gunnar Still 103

Energieeffiziente Wertstoffgewinnung mit dem ATZ-Eisenbadreaktor
Mario Mocker und Ingrid Löh 121

Technische und ökologische Rahmenbedingungen bei der Verwendung von Stahlwerksschlacke
Ruth Bialucha, Thomas Merkel und Heribert Motz 133

Humantoxikologische Bewertung von Schlacken aus der Stahlindustrie
Heidi Foth 151

Autoren und Herausgeber 167

Schlagwortverzeichnis 173

Technologie und Ökologie

Die Lech-Stahlwerke in Bayern – ein modernes Elektrostahlwerk und seine Schlackenmetallurgie

Hans Peter Markus, Hartmut Hofmeister und Michael Heußen

1. Entwicklung des Standorts 68

2. Verfahrenstechnische Ausstattung der Lech-Stahlwerke 69

3. Schlackenmetallurgie im Elektrolichtbogenofen 70

3.1. Schlacken- und Prozessführung im Lichtbogenofen 71

3.2. Prozessführung über Schlackenkonditionierung 74

4. Schlackenmetallurgie in der Sekundärmetallurgie 76

4.1. Schlacken- und Prozessführung in der Sekundärmetallurgie 77

4.2. Schwefel und nichtmetallische Einschlüsse im Stahl 77

4.3. Charakterisierung der Schlacke in der Pfannenmetallurgie 78

5. Fazit 84

6. Literatur 86



Bild 1: Die Lech-Stahlwerke 2011 (Luftaufnahme)

Die Lech-Stahlwerke GmbH (LSW) sind das jüngste Stahlwerk in Deutschland und auch das einzige Stahlwerk Bayerns. Nach der Gründung als Bayerische Elektrostahlwerke im Jahr 1970 wurde das Werk 1972 mit einer anfänglichen Kapazität von 300.000 Jahrestonnen Rohstahl in Betrieb genommen. Im Jahr 1976 erfolgte die Umbenennung zum heutigen Namen, Max Aicher trat als Minderheitsgesellschafter in die GmbH ein; seit 2005 sind die LSW zu 100 Prozent im Besitz der Familie Aicher. Heute leistet die LSW eine Rohstahlproduktion von mehr als 1,1 Millionen Tonnen pro Jahr mit Schwerpunkt Qualitäts- und Edelbaustahl. Mit einem Einsatz von mehr als 1,2 Millionen Tonnen Schrott pro Jahr sind die LSW das größte Recyclingunternehmen Bayerns.

1. Entwicklung des Standorts

Die LSW leitete um 1990 den Wandel von dem anfänglich ausschließlich Bewehrungsstahl erzeugenden Betrieb zum heutigen Produzenten hochwertiger Qualitätsstähle ein. Mit einer Vielzahl von Erweiterungs- und Neuinvestitionen wurden zum einen die Produktionskapazität des Werkes auf mehr als 1,2 Millionen Jahrestonnen Rohstahl erhöht und zum anderen die Voraussetzungen geschaffen, heute als Premiumlieferant für die europäischen Automobilhersteller und ihre Zulieferindustrien auftreten zu können.

Meilensteine dieser Entwicklung waren die Inbetriebnahme zweier Tankentgasungsanlagen, die Ertüchtigung der Stranggiessanlagen mit moderner Regelungs- und Steuerungstechnik sowie die Installation modernster Prüftechnik. Zu dieser Prüftechnik gehört eine vollautomatisierten OES-Analytik (Funkenspektrometrie) und die Online-Prüfung für die im eigenen Walzwerk erzeugten Halbzeuge mittels Wirbelstrom bzw. Thermografie (Bild 2a) sowie Anlagen für Ultraschalltauchtechnik und elektronenmikroskopische Untersuchungen.

Der Ausbau der Umweltschutztechnik begleitete stets die fortschreitende Entwicklung des Werks. Dies wird gerade in den letzten Jahren durch die Inbetriebnahme einer neuen Hallenentstaubung mit einer Filterleistung von annähernd 1.000.000 m^3/h (Bild 2b), die Einrichtung geschlossener Kühlkreisläufe und eine resultierende Einsparung von 80.000 Tonnen pro Jahr Wasser aus Tiefbrunnen und die Umsetzung verschiedener Lärmschutzmaßnahmen dokumentiert.



Bild 2a: Thermographie-Anlage



Bild 2b: Filter 4 (Hallenentstaubung)

Im Jahr 2011 präsentieren sich die Lech-Stahlwerke als hochmoderner Stahlwerksbetrieb, der nahezu allen Kundenanforderungen Rechnung tragen kann; das Produktionsspektrum deckt faktisch den ganzen Bereich niedrig- und mittellegierter Stähle bis etwa fünf Prozent Legierungsmittelgehalt ab. Neben Einsatz- und Vergütungsstählen aller Art finden sich im Sortiment auch verschiedenste Spezialitäten wie Feder-, Nitrier-, Automaten- sowie auch Wälzlagerstähle.

2. Verfahrenstechnische Ausstattung der Lech-Stahlwerke

Die Leistungsfähigkeit und Flexibilität der LSW basieren auf einer entsprechenden anlagentechnischen Ausstattung. Der Stahlwerksbetrieb verfügt über zwei weitgehend identisch ausgestattete Produktionslinien; Bild 3 veranschaulicht die Wege des Materials bei der Produktion von Beton- (BST) bzw. Qualitätsstählen (QST).

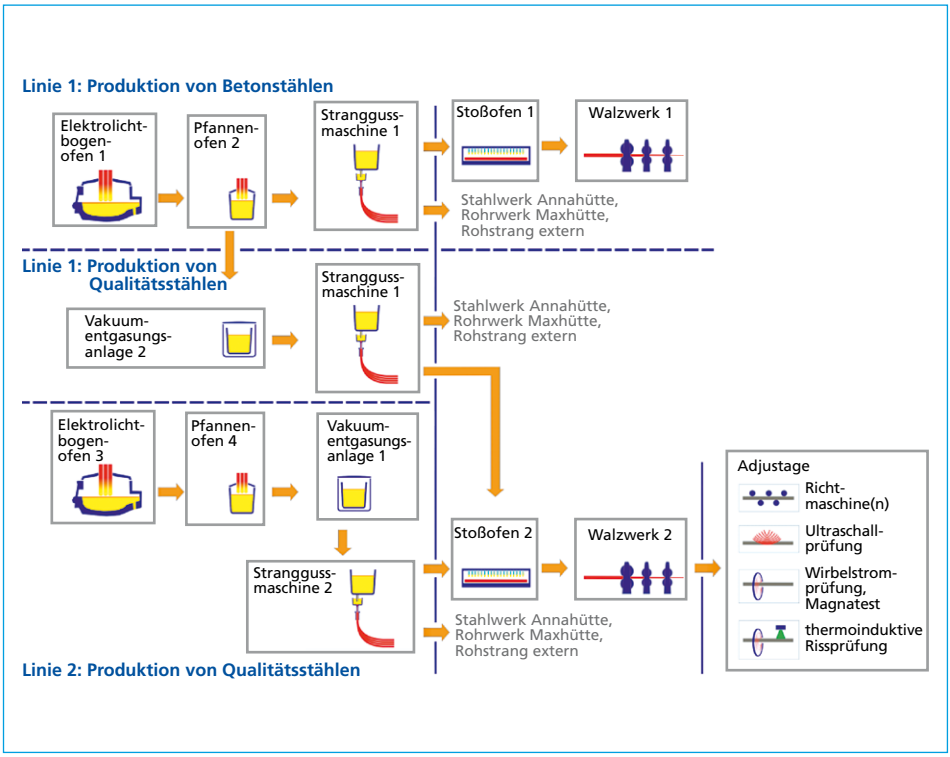


Bild 3: Produktionsflussschema der Lech-Stahlwerke GmbH

Zwei Elektrolichtbogenöfen, ausgestattet mit Transformatoren von bis zu 87 MVA und moderner Brennertechnik mit je etwa 12 MW Leistung, dienen dem Erschmelzen des flüssigen Stahls aus dem Sekundärrohstoff Schrott. Im Anschluss werden in der Sekundärmetallurgie die chemische Analyse, die Temperatur und weitere wesentliche Eigenschaften eingestellt, bevor der Stahl auf zwei Stranggießmaschinen im endlosen Strang zu Vorblöcken (Knüppeln) in Abmessungen von 130 x 130 bis zu 240 x 240 mm und bis zu sechs Meter Länge vergossen wird (Bild 4).

Ein Teil dieses Vormaterials wird direkt an die Walzwerke der Max-Aicher Gruppe in Sulzbach-Rosenberg und Hammerau ausgeliefert, zudem können bis zu 900.000 Tonnen pro Jahr in den Walzwerken der LSW verarbeitet werden. Dort erfolgt nach dem Wiedererwärmen bzw. Durchwärmen der Knüppel die Walzung zu Rund- und Vierkantformaten im Abmessungsbereich von 31 bis 130 Millimeter bzw. zu Bewehrungsstäben mit einem Durchmesser von 8 bis 32 Millimeter. Abschließend erfolgt eine in-line-Prüfung des Stabstahls mittels Thermographie, Circoflux-Verfahren und Ultraschall.



Bild 4:

Austrag der Stranggießanlage (Knüppel nach dem Gießen)

Für die Verarbeitung in zum Teil vollautomatisierten Produktionsstätten und für den Einsatz in Motoren, Getrieben, Kugellagern und anderen hochbeanspruchten Bauteilen muss das Material sehr hohen Ansprüchen genügen. Um diesen Forderungen zu entsprechen, muss der Prozess in allen Bereichen in sehr engen Grenzen gehalten werden. Dies gilt insbesondere auch für die Arbeitsschritte in der Flüssigphase mit den besonderen Aufgabenstellungen der Hochtemperaturchemie jenseits der 1.500 °C. Schlacken stellen hier nicht unerwünschte Beiprodukte dar, sondern sind das maßgebende Arbeitsmittel des Metallurgen. Eine grobe Typisierung der Schlacken aus der Stahlherstellung ist in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Metallurgische Schlacken bei LSW, Übersicht

Bezeichnung	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	FeO_n	Cr_2O_3	Anfall bezogen auf Rohstahl-produktion %
Elektroofenschlacke	20 – 35	10 – 20	5 – 15	4 – 7	30 – 50	1 – 6	15,4
Pfannenschlacke	35 – 50	5 – 20	15 – 30	5 – 15	< 2	< 1	1,64
Verteilerschlacke	4 – 6	< 2	< 2	85 – 95	< 1	< 1	0,036
Gießpulverschlack*	20 – 30	25 – 40	5 – 20	2 – 5	1 – 4	< 1	0,027

* Na_2O und K_2O: im Bereich von 2 – 15 %

Diese zum größten Teil oxidischen Phasen sind insbesondere unter den Bedingungen des Elektrolichtbogenofens unumgängliche Begleiter der jeweiligen Verfahrensstufen. Aber auch mit Blick auf eine energieeffiziente Erzeugung von hochwertigen Stählen ist die Beherrschung der zugehörigen Schlackenmetallurgie von elementarer Bedeutung.

Aus diesen Gründen wurden und werden bei den Lech-Stahlwerken verschiedene Projekte zur Verfahrensentwicklung und Prozessoptimierung in der Schlackenmetallurgie durchgeführt. Hintergründe und Ergebnisse dieser Vorhaben werden im Folgenden erläutert.

3. Schlackenmetallurgie im Elektrolichtbogenofen

Der Elektrolichtbogenofen ist in einem Elektrostahlwerk wie die LSW der bei weitem energie- und materialintensivste Prozessschritt. Der Schmelzprozess erfordert sowohl elektrische wie auch chemische Energie, wobei die Gewichtung die Effizienz des Prozesses bestimmt.

Innerhalb von weniger als 60 Minuten werden mit einem Aufwand von etwa 45 MWh elektrischer Energie, 600 m^3 Erdgas und 3.300 m^2 Sauerstoff 100 Tonnen flüssiger Rohstahl mit einer Temperatur von etwa 1.650 °C erzeugt. Der Stahl wird dabei zu hundertProzent aus Stahlschrott erschmolzen, auf den Einsatz von Eisenträgern aus Primärrohstoffen wird vollständig verzichtet.

Dabei kommt es zwangsläufig – wie bei allen Prozessen der Eisen- und Stahlerzeugung – zur Bildung einer Schlacke aus den Einsatzstoffen des Verfahrens. Der Hauptbestandteil dieser Schlacke sind Eisenoxide, da in Abhängigkeit von der Qualität des Schrotts zwischen 5 bis 15 Prozent des metallischen Einsatzes verschlackt (verbrannt) und von der Schlacke aufgenommen werden. Weitere wesentliche Komponenten sind Kalzium- und Magnesiumoxid, deren Gehalt durch bedarfsgerechte Zugaben von Branntkalk (CaO) und gebranntem Dolomit (CaO·MgO) eingestellt wird.

Die Zusammensetzung der teilweise legierten Stahlschrotte hat einen spürbaren Einfluss auf die Schlackenzusammensetzung; während zum Beispiel die Legierungsgehalte an Nickel im eingesetzten Schrott fast vollständig in den neu erschmolzenen Stahl übergehen, findet sich Chrom zum größeren Teil in der Schlacke wieder und beeinflusst dementsprechend die Chromoxidgehalte (siehe Tabelle 1). Darüber hinaus bindet die Schlacke eine Reihe weiterer unerwünschter Bestandteile aus dem Schrott ab und ermöglicht damit die Erzeugung eines hochwertigen Rohstahls.

3.1. Schlacken- und Prozessführung im Lichtbogenofen

Zwei für dieses Verfahren wesentliche Reaktionsabläufe sind unmittelbar von der Schlackenführung im Elektrolichtbogenofen abhängig: zum einen die Entfernung unerwünschter Begleitelemente aus dem Stahl in die Schlacke (u. a. Phosphor, Schwefel), zum anderen die Erzeugung einer sogenannten Schaumschlacke.

Kern der Schaumschlackentechnologie ist die Abschirmung des auf dem Stahlbad brennenden Lichtbogens mit maximalen Wirkleistungen (bei LSW) von über 60 MW. Dabei wird die Schlacke durch Bildung von gasförmigen Kohlenoxiden auf ein Mehrfaches ihres vorherigen Volumens aufgeschäumt und der Lichtbogen idealerweise vollständig eingehüllt.

Wie die Bilder 5a bis c veranschaulichen, kann der Wirkungsgrad des Lichtbogens dadurch um annähernd das Dreifache auf deutlich über 90 Prozent gesteigert werden. Gleichzeitig wird die Ofenwandung vor der beträchtlichen Wärmestrahlung abgeschirmt, die im Extremfall, d. h. wie bei einer Fahrweise unter Bild 5a, zur Zerstörung des Ofens führen kann. Die Bilder 5d und e illustrieren Grenzfälle des Verfahrens.

Das aufschäumende Gas kann sowohl in der Schlacke, im Stahlbad als auch an der Phasengrenzfläche zwischen beiden gebildet werden. Da die Entkohlung des Bades durch eingeblasenen oder gelösten Sauerstoff unter den Bedingungen eines ausschließlich mit Schrott beschickten Elektrolichtbogenofens das für ein gutes und fortgesetztes Schäumen notwendigen Volumen Kohlenmonoxid nicht liefern kann, ist der Einsatz zusätzlicher Kohlenstoffträger notwendig. Das bei weitem gebräuchlichste Verfahren ist das Einblasen von Schäumkohlen, welches im Regelfall in Handsteuerung durch den Operator erfolgt.

Auch im Hinblick darauf, dass die ggf. beträchtliche Wärmestrahlung als Verlustleistung anzusehen ist, ist eine effektive Schaumschlackenfahrweise von zentraler Bedeutung für die Energieeffizienz und Sicherheit des Ofenbetriebs. Dabei darf eine bestimmte Schlackenhöhe nicht unterschritten werden, denn der Lichtbogen sollte zu jedem Zeitpunkt vollständig von Schlacke umgeben sein.

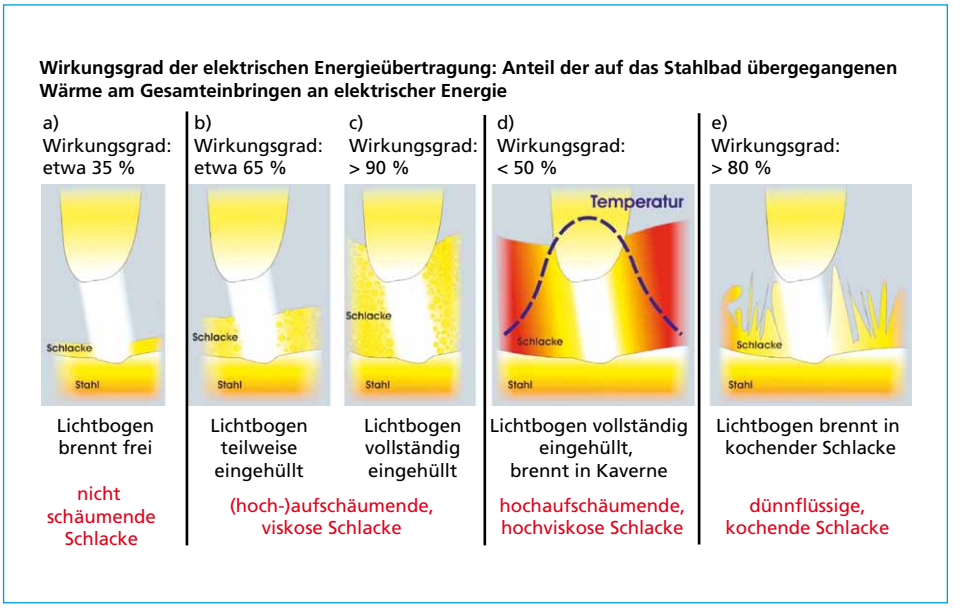


Bild 5: Einfluss verschiedener (Schaum-)Schlackenfahrweisen auf den Wirkungsgrad des Einbringens an Elektroenergie; a) Fahrweise ohne Schaumschlacke; b) + c) Fahrweise mit viskosen Schaumschlacken; d) Grenzfall bei Fahrweise mit viskosen Schaumschlacken – Ausbildung einer Kaverne um den Lichtbogen, großer Temperaturgradient; e) Fahrweise mit dünnflüssigen, hochaufkochenden Schlacken

Quellen:

Ameling, D.; Petry, J.; Sittard, M.; Ullrich, W.; Wolf, J.: Untersuchungen zur Schaumschlackenbildung im Elektrolichtbogenofen. Stahl und Eisen 106 (1986) 11; S. 625–630

Timm, K.; Pfeiler, T.: Optimierung der Fahrweise eines Drehstrom-Lichtbogenofens. Elektrowärme International 50 (1992) B 2; S. B 199–B 205

Markus, H. P.: Untersuchung der Verteilungsgleichgewichte im Elektrolichtbogenofen beim Einblasen von feinkörnigen Schlackenbildnern. Interner Bericht; Lech-Stahlwerke GmbH; Meitingen; 2007

Bestimmende Faktoren des Schlackenschäumens sind die Reaktionsabläufe der Umsetzung des Kohlenstoffs zu gasförmigen Kohlenoxiden (und damit die zur Verfügung stehende Gasmenge) und die Viskosität der Schlacke, die das Gasrückhaltevermögen bestimmt. Diese beiden Momente sind wiederum von einer Vielzahl anderer Bedingungen abhängig, wie in Bild 6 vereinfacht dargestellt ist.

Zur Beschreibung des Phänomens wird in der Literatur der Schäumindex Σ verwendet, der wie folgt definiert ist:

$$\Sigma = h \cdot V_G^{-1} = k \cdot \frac{\eta_{SL}^{a}}{\rho_{SL}^{b} \cdot \sigma_L^{c} \cdot d_{BL}^{d}} \qquad (1)$$

Grundsätzlich ist der Schäumindex umso größer, je größer die Schlackenhöhe h und je geringer die Aufstiegsgeschwindigkeit der Gasblasen VG ist. Damit bildet Σ die Verweildauer der Gasblasen ab und ist ein Maß für das Gasvolumen in der Schlacke; gut schäumende Schlacken weisen Gasgehalte > 95 Prozent auf und erreichen demzufolge mehr als zwanzigfache ihres ursprünglichen Volumens [10].

Schlagwortverzeichnis

A

Abfallverbrennungsasche 44
Abgrabungen 39
Altlasten 33
Arbeitsstoffe 150
Arbeitstoxikologie 151
Auslaugbarkeit 136
Auslaugverhalten 100, 137

B

Baustoff 94, 106, 131
Beteiligungsmodelle 55
Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung 28, 32, 48

C

Chemikaliensicherheit 151

D

Deckschichten 149
Deponiebau 97
Deponieersatzbaustoff 97, 99
Deponieverordnung 98
Dispersverluste 14
Dränwasser 149
Düngemittel 131

E

Einwendungen 53
Eisenbadreaktor 119
Eisenerzverhüttung 92
Eisenhüttenindustrie 29
Eisenhüttenschlacke 103, 131
Elektrolichtbogenofen 70
Elektroofen 92
Elektroofenschlacke 92, 149
Elektrostahlwerk 67
EloMinit 96
Eluat 29
Elutionsverfahren 29
Entwässerungsschicht 98
Erdbau 135
Erörterungstermin 52
Erosionsschutz 98
Ersatzbaustoffe 28, 43
Ersatzbaustoffverordnung 47, 141

F

Fahrbahnbelag 96, 98
Flughafen Schönefeld 51
Flughafenerweiterung Frankfurt 51
Frostschäden 96
Frostschutzkies 96
Frostschutzmaterial 96
Frostschutzschicht 96

G

Gefahrenabwehr 153
Geländeprofilierungen 98
Genehmigungsvorhaben 52
Geringfügigkeitsschwellenwerte 48, 142
Gießereikupolofenschlacke 45
Gießereirestsand 45
Gießereirückstände 29
Gleisbau 135
Grenzwerte 155
Grundwasserrichtlinie 31
Grundwasserschutz 28
Güteüberwachung 36, 44

H

Hochofenschlacke 104, 149
Hochofenstückschlacke 105
Hochofen- und Stahlwerksschlacken 44
Humantoxikologie 149
Hüttenkalk 106
Hüttensand 45, 104

I

Industriebau 98
Infrastrukturmaßnahmen 51

K

Konverterkalk 105
Kraftwerksplanungen 51
Kreislaufwirtschaft 3
Kupferbadreaktor 119

L

Länderarbeitsgemeinschaft Abfall 46, 98
Landschaftsbauwerke 106
Lärm- und Erdschutzwälle 149
Lech-Stahlwerke 67
Leitlinien 150
Lichtbogenofen 71
Linz-Donawitz-Verfahren 105

M

Mantelverordnung 28, 47
Materialeffizienz 4
Materialwerte 29
Mediation 57
Metallhüttenschlacken 45
mineralische Abfälle 25
mineralische Massenstoffe 44
Molybdän 36

N

Nebenprodukte 25

O

Oberflächenabdichtung 97
OBM-Konverter 120
Öffentlichkeitsbeteiligung 51, 57
OxyCupShaftFurnace Prozess 107

P

Partizipation 51
Pfannenmetallurgie 78
Planfeststellungsverfahren 54
Produkte 103
Projektmanager 56
Prüfverfahren 36
Prüfwerte 34, 48

Q

Qualitätssicherung 144

R

REACH-Verordnung 140
Recyclingbaustoffe 44
Rekultivierungsverpflichtung 39
Ressourceneffizienzprogramm 39
Risikoabwägung 159

S

Säulenverfahren 29, 137
Schachtofenschlacke 107
Schaumschlackentechnologie 71
Schlackebeet 92, 95, 105
Schlacken 43, 149
Schlackenkonditionierung 74
Schlackenmetallurgie 67, 76
Schlackenpfanne 107
Schmelzkammergranulat 45
Schüttelverfahren 137
Schwefel 77
Scoping-Termin 59
Sekundärmetallurgie 76
Sofortvollzug 53
Stahlindustrie 131
Stahlwerksschlacke 105, 131
Steinkohlenflugasche 45
Stoffströme 3
Stoffwandlungskette 5
Straßenbau 96, 135
Straßendamm 149
Straßen- und Erdbau 43
Stückschlacke 132
Stuttgart 21 51
Sulfat 36

T

Tagebau 39
Tierhaltungsanlagen 51

Toxikologie 150
Tragschicht 149
Trinkwasserverordnung 31

U

Untergrundstabilisierung 98

V

Vanadium 36
Verdachtsflächen 33
Verformungswiderstand 135
Verfüllmaterial 37
Verwertungsquote 36
Verwertungsregelungen 35
Vollzugserfahrung 43
Vorerörterung 57
Vorsorgeanforderungen 33
Vorsorgewerte 34

W

Waschberge 45
Wasserbau 98, 135
Wasserbausteine 106
Wasserhaushaltsgesetz 46
Wegebau 135
Wertschöpfungskette 4
Wirkschwellen 155