

Jörg Woidasky, Katrin Ostertag, Christian Stier (Herausgeber)

# **Innovative Technologien für Ressourceneffizienz in rohstoffintensiven Produktionsprozessen**

Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Fördermaßnahme  
"r<sup>2</sup> - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz  
– rohstoffintensive Produktionsprozesse"  
des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)

Karlsruhe, August 2013

veröffentlicht im Fraunhofer-Verlag (Stuttgart)

# Inhaltsübersicht

Grußwort der Bundesministerin für Bildung und Forschung .....	III
Autoren .....	V
Vorwort der Herausgeber .....	XXXIII
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Metalle .....</b>	<b>4</b>
2.1 Rückführung hochwertiger Metallfraktionen aus Abfallströmen .....	4
2.1.1 „SHREDDER-SAND“ - Rückgewinnung feinkörniger NE-Metallphasen aus Shredder-Sanden .....	4
2.1.2 Autotherme Metallrückgewinnung aus WEEE-Schrott durch energieoptimierte zero-waste Metallurgie .....	19
2.1.3 Analyse von Sekundärrohstoffen durch mikrowellenunterstützte Laser- Emissionsspektroskopie .....	38
2.1.4 Innovative Gewinnung von Wertmetallen aus Kupferschiefer-Halden des ehemaligen Mansfelder Bergbaudistriktes, Sachsen-Anhalt .....	52
2.1.5 Bessere Ressourcennutzung und Senkung des Primärenergieverbrauchs in der Bleimetallurgie .....	68
2.1.6 Entzinkung von Stahlschrotten .....	82
2.2 Verbesserung der Materialeffizienz in der Metallerzeugung .....	98
2.2.1 Optimierte Prozessführung zur ressourceneffizienten Stahlerzeugung im Konverterprozess .....	98
2.2.2 Vermeidung von Metallverlusten in metallurgischen Schlacken am Beispiel der Kupfererzeugung .....	114
2.2.3 Ressourceneffizienz mit dem Bandgießverfahren: Qualifizierung des Prozesses für die Produktion von HSD®-Stählen im Pilotmaßstab .....	129
2.2.4 Herstellung eines phosphathaltigen Kalkdüngemittels auf der Basis von Stahlwerksschlacken und Reststoffphosphaten .....	144
2.2.5 Erhöhung der Energie- und Materialeffizienz der Stahlerzeugung im Lichtbogenofen .....	158
2.2.6 Ressourceneffiziente Formgebungsverfahren für Titan und hochwarmfeste Legierungen .....	172
2.3 Einordnung in das Forschungsfeld Metallurgie .....	185

<b>3</b>	<b>Katalyse und Beschichtungsprozesse.....</b>	<b>195</b>
3.1	Katalytische Prozesse in der chemischen Industrie .....	195
3.1.1	Effizienzsteigerung bei der Chlorherstellung .....	195
3.1.2	„ReAlSeIOx“ – Ressourceneffiziente AlkanSelektivOxidation an neuen kristallinen Festkörperphasen .....	209
3.2	Schließung von Kreisläufen in Beschichtungsprozessen.....	224
3.2.1	Effizienztechnologie für die Kreislaufschließung von Metallen und Spülwasser in der Weißblechproduktion .....	224
3.2.2	Entwicklung, Simulation und prozesssichere Umsetzung zur umweltfreundlicheren und wirtschaftlicheren Beschichtung von komplexen Kunststoffbauteilen (ENSIKOM) .....	236
3.3	Einordnung in das Forschungsfeld Katalyse und Beschichtungsprozesse .....	243
<b>4</b>	<b>Mineralische Materialien .....</b>	<b>267</b>
4.1	Trocknungs- und Sintervorgänge in der Keramikindustrie .....	267
4.1.1	DRY-CONTROL - Entwicklung einer ressourceneffizienten Trocknungstechnologie für keramische Produkte .....	267
4.1.2	Ressourceneffiziente Keramik-Niedrigtemperaturesinterung .....	281
4.2	Verbesserung der Materialeffizienz durch innovative Baustoffe .....	300
4.2.1	Entwicklung von Leichtgranulaten aus Mauerwerkbruch für die Betonherstellung .	300
4.2.2	Celiment – Entwicklung eines nachhaltigen Zementes .....	317
4.3	Einordnung in das Forschungsfeld Mineralik und Baustoffe .....	334
<b>5</b>	<b>Netzwerke und Begleitforschung.....</b>	<b>344</b>
5.1	Netzwerk und internetbasierte Webplattform zur Ressourceneffizienz als Lern- und Anwendungsmittel - RESEFI .....	344
5.2	Ergebnisse der r <sup>2</sup> -Begleitforschung: Potenziale von Innovationen in rohstoffintensiven Produktionsprozessen .....	356
5.3	Einordnung in das Forschungsfeld Ressourceneffizienz .....	395
<b>6</b>	<b>Wege zu einer umweltverträglichen Rohstoffwirtschaft.....</b>	<b>407</b>
<b>7</b>	<b>Schlagwortverzeichnis.....</b>	<b>433</b>

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Metalle</b>	<b>4</b>
2.1	Rückführung hochwertiger Metallfraktionen aus Abfallströmen	4
2.1.1	„SHREDDER-SAND“ - Rückgewinnung feinkörniger NE-Metallphasen aus Shredder-Sanden	4
2.1.1.1	Stand zum Vorhabensbeginn	4
2.1.1.2	Ziel des Vorhabens	6
2.1.1.3	Methoden und Verfahren	7
2.1.1.4	Wichtigste Ergebnisse	9
2.1.1.5	Zielerreichung	13
2.1.1.6	Forschungsbedarf	13
2.1.1.7	Ressourceneffizienzpotenzial	14
2.1.1.8	Ansprechpartner	17
2.1.1.9	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens	18
2.1.1.10	Quellen	18
2.1.2	Autotherme Metallrückgewinnung aus WEEE-Schrott durch energieoptimierte zero-waste Metallurgie	19
2.1.2.1	Stand zum Vorhabensbeginn	19
2.1.2.2	Ziel des Vorhabens	22
2.1.2.3	Methoden und Verfahren	23
2.1.2.4	Wichtigste Ergebnisse	28
	Materialcharakterisierung	28
	Ergebnisse der Laboruntersuchungen	29
	Ergebnisse der Technikums-Versuche	32
2.1.2.5	Zielerreichung	33
2.1.2.6	Forschungsbedarf	35
2.1.2.7	Ressourceneffizienzpotenzial	35
2.1.2.8	Ansprechpartner	36
2.1.2.9	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens	36
2.1.2.10	Quellen	37
2.1.3	Analyse von Sekundärrohstoffen durch mikrowellenunterstützte Laser-Emissionsspektroskopie	38
2.1.3.1	Stand zum Vorhabensbeginn	38
2.1.3.2	Ziel des Vorhabens	39
2.1.3.3	Methoden und Verfahren	40

2.1.3.4	Wichtigste Ergebnisse .....	42
2.1.3.5	Zielerreichung .....	46
2.1.3.6	Forschungsbedarf .....	47
2.1.3.7	Ressourceneffizienzpotenzial .....	48
2.1.3.8	Ansprechpartner .....	50
2.1.3.9	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens.....	51
2.1.3.10	Quellen .....	51
2.1.4	<b>Innovative Gewinnung von Wertmetallen aus Kupferschiefer-Halden des ehemaligen Mansfelder Bergbaudistriktes, Sachsen-Anhalt .....</b>	<b>52</b>
2.1.4.1	Stand zum Vorhabensbeginn.....	52
2.1.4.2	Ziel des Vorhabens .....	54
2.1.4.3	Methoden und Verfahren.....	55
2.1.4.4	Wichtigste Ergebnisse .....	57
2.1.4.5	Zielerreichung .....	60
2.1.4.6	Forschungsbedarf .....	62
2.1.4.7	Ressourceneffizienzpotenzial .....	63
2.1.4.8	Ansprechpartner .....	65
2.1.4.9	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens.....	65
2.1.4.10	Quellen .....	66
2.1.5	<b>Bessere Ressourcennutzung und Senkung des Primärenergieverbrauchs in der Bleimetallurgie .....</b>	<b>68</b>
2.1.5.1	Stand zum Vorhabensbeginn.....	68
2.1.5.2	Ziel des Vorhabens .....	69
2.1.5.3	Methoden und Verfahren.....	70
	Reduktionsversuche im Tiegelmaßstab.....	70
	Untersuchung alternativer Reduktionsmittel für Bleipaste .....	71
	Aufarbeitung antimon- und zinnhaltiger Raffinationsprodukte .....	72
2.1.5.4	Wichtigste Ergebnisse .....	72
	Alternative Reduktionsmittel für Bleipaste .....	72
	Aufarbeitung antimon- und zinnhaltiger Kreislaufprodukte .....	74
2.1.5.5	Zielerreichung .....	77
	Alternative Reduktionsmittel für Bleipaste.....	77
	Aufarbeitung antimon- und zinnhaltiger Kreislaufprodukte .....	78
2.1.5.6	Forschungsbedarf .....	80
2.1.5.7	Ressourceneffizienzpotenzial .....	80
2.1.5.8	Ansprechpartner .....	81
2.1.5.9	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens.....	81

2.1.6	Entzinkung von Stahlschrotten .....	82
2.1.6.1	Stand zum Vorhabensbeginn .....	82
2.1.6.2	Ziel des Vorhabens .....	84
	Globalziel .....	84
	Teilziele .....	85
2.1.6.3	Wichtigste Ergebnisse .....	86
	Stoffstrom „Entzinker Edelschrott“: Sammlung, Bereitstellung und Transport zur Gießerei .....	89
2.1.6.4	Zielerreichung .....	93
2.1.6.5	Forschungsbedarf .....	94
2.1.6.6	Ressourceneffizienzpotenzial .....	94
2.1.6.7	Ansprechpartner .....	95
2.1.6.8	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens .....	96
2.1.6.9	Quellen .....	97
2.2	Verbesserung der Materialeffizienz in der Metallerzeugung .....	98
2.2.1	Optimierte Prozessführung zur ressourceneffizienten Stahlerzeugung im Konverterprozess .....	98
2.2.1.1	Stand zum Vorhabensbeginn .....	98
2.2.1.2	Ziel des Vorhabens .....	99
2.2.1.3	Methoden und Verfahren .....	99
2.2.1.4	Wichtigste Ergebnisse .....	101
	Entwicklung und Validierung des Prozessmodells .....	101
	Implementierung einer neuen Abgasanalysetechnik .....	104
	Optimierte Blasendpunktbestimmung .....	107
	Automatische Korrektur des Blasvorgangs .....	108
2.2.1.5	Zielerreichung .....	110
2.2.1.6	Forschungsbedarf .....	111
2.2.1.7	Ressourceneffizienzpotenzial .....	112
2.2.1.8	Ansprechpartner .....	112
2.2.1.9	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens .....	113
2.2.1.10	Quellen .....	113
2.2.2	Vermeidung von Metallverlusten in metallurgischen Schlacken am Beispiel der Kupfererzeugung .....	114
2.2.2.1	Stand zum Vorhabensbeginn .....	114
2.2.2.2	Ziel des Vorhabens .....	116
2.2.2.3	Methoden und Verfahren .....	118
2.2.2.4	Wichtigste Ergebnisse .....	120

Erarbeitung der metallurgischen Grundlagen – Laborversuche am IME.....	120
Versuche im Technikums-Maßstab mit Festeinsatz.....	122
Versuche im Pilotmaßstab bei Aurubis mit Flüssigeinsatz.....	123
2.2.2.5    Zielerreichung .....	125
Erarbeitung der metallurgischen Grundlagen - Laborversuche am IME.....	125
Versuche im Technikums-Maßstab mit Festeinsatz - Aufbau und Versuche des Aachener Rührreaktors im Technikums-Maßstab.....	125
Versuche im Pilotmaßstab bei Aurubis mit Flüssigeinsatz.....	125
2.2.2.6    Forschungsbedarf .....	126
2.2.2.7    Ressourceneffizienzpotenzial .....	127
2.2.2.8    Ansprechpartner .....	128
2.2.2.9    Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens.....	128
2.2.2.10   Quellen .....	128
2.2.3    Ressourceneffizienz mit dem Bandgießverfahren: Qualifizierung des Prozesses für die Produktion von HSD®-Stählen im Pilotmaßstab .....	129
2.2.3.1    Stand zum Vorhabensbeginn.....	129
Stand der Technik und Bandgießverfahren .....	129
2.2.3.2    Ziel des Vorhabens.....	131
Teilziele der Arbeitspakete.....	131
2.2.3.3    Methoden und Verfahren.....	132
Ökobilanzielle Modellierung zur Beurteilung der Ressourcen- und Energieeffizienz.....	133
2.2.3.4    Wichtigste Ergebnisse .....	133
2.2.3.5    Zielerreichung .....	137
2.2.3.6    Forschungsbedarf .....	138
2.2.3.7    Ressourceneffizienzpotenzial .....	139
2.2.3.8    Zusammenfassung.....	141
2.2.3.9    Ansprechpartner .....	141
2.2.3.10   Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens.....	142
2.2.3.11   Quellen .....	143
2.2.4    Herstellung eines phosphathaltigen Kalkdüngemittels auf der Basis von Stahlwerksschlacken und Reststoffphosphaten .....	144
2.2.4.1    Stand zum Vorhabensbeginn.....	144
2.2.4.2    Ziel des Vorhabens.....	145
2.2.4.3    Methoden und Verfahren.....	146
Ermittlung der Löslichkeit und Aufschlusseffizienz von Klärschlamm- und Tiermehlaschen in flüssige LD-Schlacke in Laborversuchen .....	146
Verifizierung der Ergebnisse der Laborversuche in Betriebsversuchen.....	146

Optimierung der betrieblichen Behandlung von LD-Schlacken mit Aschen .....	147
Maßnahmen in der Aufbereitung.....	147
Festlegung von Qualitätsanforderungen an Einsatzstoffe und erzeugte Produkte .....	148
Überprüfung der pflanzenphysiologischen Verfügbarkeit und Düngewirksamkeit in Gefäß- und Feldversuchen.....	148
2.2.4.4 Wichtigste Ergebnisse .....	148
Auswirkungen der P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Anreicherung von LD-Schlacke durch Aschen .....	149
Technische Umsetzung der Behandlung .....	150
Düngewirksamkeit des erzeugten Produkts.....	152
2.2.4.5 Zielerreichung .....	153
2.2.4.6 Forschungsbedarf .....	154
2.2.4.7 Ressourceneffizienzpotenzial .....	155
2.2.4.8 Ansprechpartner .....	156
2.2.4.9 Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens.....	156
2.2.4.10 Quellen .....	157
2.2.5 Erhöhung der Energie- und Materialeffizienz der Stahlerzeugung im Lichtbogenofen .....	158
2.2.5.1 Stand zum Vorhabensbeginn.....	158
2.2.5.2 Ziel des Vorhabens .....	159
2.2.5.3 Methoden und Verfahren.....	159
Verringerung der thermischen Verluste durch feuerfeste Zustellung.....	159
Verbesserung der Energieeffizienz durch Prozesssteuerung und -regelung.....	160
Lichtbogenofenprozess der Georgsmarienhütte .....	160
Modellierung des Lichtbogenofenprozesses der GMH.....	161
Abgasanalyse am Lichtbogenofen der GMH .....	161
2.2.5.4 Wichtigste Ergebnisse .....	162
Verringerung der thermischen Verluste durch feuerfeste Zustellung.....	162
Verbesserung der Energieeffizienz durch Prozesssteuerung und -regelung.....	163
Modellierung des Lichtbogenofenprozesses der GMH.....	164
Optimierung des chemischen Energieeintrags .....	164
Optimierung des metallischen Ausbringens durch gezielte Sauerstoffzufuhr.....	166
2.2.5.5 Zielerreichung .....	168
2.2.5.6 Forschungsbedarf .....	168
2.2.5.7 Ressourceneffizienzpotenzial .....	169
2.2.5.8 Ansprechpartner .....	170
2.2.5.9 Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens.....	170
2.2.5.10 Quellen .....	170



2.2.6	Ressourceneffiziente Formgebungsverfahren für Titan und hochwarmfeste Legierungen .....	172
2.2.6.1	Stand zum Vorhabensbeginn .....	172
2.2.6.2	Ziel des Vorhabens .....	173
2.2.6.3	Methoden und Verfahren .....	174
2.2.6.4	Wichtigste Ergebnisse .....	175
	Neue Erkenntnisse zu Materialkennwerten und Materialverhalten hochwarmfester Metalllegierungen .....	175
	Werkzeugentwicklung für Verfahren inkrementeller Walztechnologien .....	176
	Entwicklung Umformtechnologien - Axial-Vorschub-Querwalzen (AVQ) .....	177
	Prozessabbildung und Optimierung mittels numerischer Simulation .....	178
2.2.6.5	Zielerreichung .....	179
2.2.6.6	Forschungsbedarf .....	180
2.2.6.7	Ressourceneffizienzpotenzial .....	180
	Beispiel 1 – Masseverteilung in der Herstellung von Triebwerkschaufeln .....	180
	Beispiel 2 – Axialgesenkwalzen von Ventilsitzen .....	182
2.2.6.8	Ansprechpartner .....	183
2.2.6.9	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens .....	184
2.3	Einordnung in das Forschungsfeld Metallurgie .....	185
2.3.1	Vorbemerkung .....	185
2.3.2	Forschungsschwerpunkte .....	185
2.3.2.1	Rückführung hochwertiger Metallfraktionen aus Abfallströmen .....	186
2.3.2.2	Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz in der Metallerzeugung .....	188
2.3.2.3	Neue Verfahrensentwicklung .....	189
2.3.3	Einordnung der erzielten Forschungsergebnisse in den Forschungs- und Entwicklungskontext .....	190
2.3.3.1	Stoffkreisläufe .....	191
2.3.3.2	Energie- und Reduktionsmittelverbrauch .....	191
2.3.3.3	Entfallstoffe .....	191
2.3.3.4	Ur- und Umformen .....	192
2.3.4	Zukünftige Forschungsbedarfe .....	192
2.3.5	Quellen .....	194
<b>3</b>	<b>Katalyse und Beschichtungsprozesse .....</b>	<b>195</b>
3.1	Katalytische Prozesse in der chemischen Industrie .....	195
3.1.1	Effizienzsteigerung bei der Chlorherstellung .....	195
3.1.1.1	Stand zum Vorhabensbeginn .....	195
3.1.1.2	Ziel des Vorhabens .....	196

3.1.1.3	Methoden und Verfahren.....	197
3.1.1.4	Wichtigste Ergebnisse .....	198
	Katalysatorentwicklung.....	198
	Charakterisierung .....	200
	Testung .....	202
	Elektrolyse.....	202
	Gasphasenoxidation (Deacon).....	203
3.1.1.5	Zielerreichung .....	204
	Elektrolyse-Verfahren .....	204
	Deacon-Verfahren .....	204
3.1.1.6	Forschungsbedarf .....	204
3.1.1.7	Ressourceneffizienzpotenzial .....	205
3.1.1.8	Ansprechpartner .....	205
3.1.1.9	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens.....	205
3.1.2	„ReAlSelOx“ – Ressourceneffiziente AlkanSelektivOxidation an neuen kristallinen Festkörperphasen .....	209
3.1.2.1	Stand zum Vorhabensbeginn .....	209
	Situationsbeschreibung: Rohstoffe.....	209
	Situationsbeschreibung: Selektivoxidationen.....	210
	Motivation und Problemstellung .....	212
3.1.2.2	Ziel des Vorhabens .....	213
3.1.2.3	Methoden und Verfahren.....	213
	Testverfahren und Testbedingungen .....	215
3.1.2.4	Wichtigste Ergebnisse .....	215
	Ag-V-P-O Phasen.....	215
	Ti-V-P-O-Phasen.....	216
	V-B-P-O System.....	218
3.1.2.5	Zielerreichung .....	220
3.1.2.6	Forschungsbedarf .....	221
3.1.2.7	Ressourceneffizienzpotenzial .....	221
3.1.2.8	Ansprechpartner .....	221
3.1.2.9	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens.....	222
3.1.2.10	Quellen .....	222
3.2	Schließung von Kreisläufen in Beschichtungsprozessen.....	224
3.2.1	Effizienztechnologie für die Kreislaufschließung von Metallen und Spülwasser in der Weißblechproduktion .....	224
3.2.1.1	Stand zum Vorhabensbeginn .....	224

3.2.1.2	Ziel des Vorhabens .....	226
3.2.1.3	Methoden und Verfahren.....	227
3.2.1.4	Wichtigste Ergebnisse .....	229
3.2.1.5	Zielerreichung .....	232
3.2.1.6	Forschungsbedarf .....	233
3.2.1.7	Ressourceneffizienzpotenzial .....	233
3.2.1.8	Ansprechpartner .....	234
3.2.1.9	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens.....	234
3.2.1.10	Quellen .....	235
3.2.2	Entwicklung, Simulation und prozesssichere Umsetzung zur umweltfreundlicheren und wirtschaftlicheren Beschichtung von komplexen Kunststoffbauteilen (ENSIKOM) .....	236
3.2.2.1	Stand zum Vorhabensbeginn.....	236
3.2.2.2	Ziel des Vorhabens .....	237
3.2.2.3	Methoden und Verfahren.....	238
3.2.2.4	Wichtigste Ergebnisse .....	240
3.2.2.5	Zielerreichung .....	240
3.2.2.6	Forschungsbedarf .....	240
3.2.2.7	Ressourceneffizienzpotenzial .....	240
3.2.2.8	Ansprechpartner .....	241
3.2.2.9	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens.....	242
3.2.2.10	Quellen .....	242
3.3	Einordnung in das Forschungsfeld Katalyse und Beschichtungsprozesse .....	243
3.3.1	Katalytische Prozesse in der chemischen Industrie .....	243
3.3.1.1	Vorbemerkung.....	243
3.3.1.2	Einordnung verfahrenstechnischer Prozesse in die industrielle Produktion.....	244
3.3.1.3	Ressourceneffizienz bei chemischen Prozessen .....	246
3.3.1.4	Katalytische Prozesse zur Steigerung der Ressourceneffizienz bei chemischen Prozessen.....	248
3.3.1.5	Einordnung der erzielten Forschungsergebnisse in den Forschungs- und Entwicklungskontext der Ressourceneffizienz chemischer Prozesse .....	249
3.3.1.6	Zukünftiger Forschungsbedarf .....	250
3.3.1.7	Zusammenfassung .....	253
3.3.2	Beschichtungsprozesse .....	254
3.3.2.1	Einleitung .....	254
3.3.2.2	Stand der Technik.....	255
	Metallverarbeitende Industrie.....	255

Kunststoffverarbeitende Industrie .....	259
Glasverarbeitende Industrie.....	260
Strukturiertes Beschichten.....	261
3.3.2.3  Beispiele .....	261
3.3.2.4  F&E-Bedarf .....	262
3.3.2.5  Schlussbemerkung.....	264
3.3.3    Quellen.....	264
<b>4  Mineralische Materialien .....</b>	<b>267</b>
4.1      Trocknungs- und Sintervorgänge in der Keramikindustrie .....	267
4.1.1    DRY-CONTROL - Entwicklung einer ressourceneffizienten Trocknungstechnologie für keramische Produkte .....	267
4.1.1.1  Stand zum Vorhabensbeginn .....	267
4.1.1.2  Ziel des Vorhabens .....	270
4.1.1.3  Methoden und Verfahren.....	271
Feuchtebestimmung.....	271
Aktive Thermographie zur Rissdetektion.....	271
Lokale Mikrowellentrocknung .....	272
4.1.1.4  Wichtigste Ergebnisse .....	273
Aufbau eines Sensors zur Detektion von Feuchtenestern .....	273
Thermographische Rissprüfung.....	273
Reproduzierbare und steuerbare Erwärmung mit Mikrowellen .....	275
Auslegung der Mikrowellenanlage zur lokalen Trocknung von Feuchtenestern .....	276
Mikrowellenverschlüsse .....	277
4.1.1.5  Zielerreichung .....	279
4.1.1.6  Forschungsbedarf .....	279
4.1.1.7  Ressourceneffizienzpotenzial .....	279
4.1.1.8  Ansprechpartner .....	279
4.1.1.9  Quellen .....	280
4.1.2    Ressourceneffiziente Keramik-Niedrigtemperaturesinterung .....	281
4.1.2.1  Stand zum Vorhabensbeginn.....	281
4.1.2.2  Ziel des Vorhabens .....	284
4.1.2.3  Methoden und Verfahren.....	285
4.1.2.4  Wichtigste Ergebnisse .....	287
Porzellangranulat mit hohem Anteil an Recyclingmaterial zum isostatischen Pressen .....	292
Entwicklung eines Nasspressgranulates .....	292
Einsatz von Holzgas als Brennstoff für Trocknungs- und Sintervorgänge .....	296

4.1.2.5	Zielerreichung .....	297
4.1.2.6	Forschungsbedarf .....	298
4.1.2.7	Ressourceneffizienzpotenzial .....	298
4.1.2.8	Ansprechpartner .....	299
4.1.2.9	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens.....	299
4.1.2.10	Quellen .....	299
4.2	Verbesserung der Materialeffizienz durch innovative Baustoffe .....	300
4.2.1	Entwicklung von Leichtgranulaten aus Mauerwerkbruch für die Betonherstellung .	300
4.2.1.1	Stand zum Vorhabensbeginn.....	300
4.2.1.2	Ziel des Vorhabens .....	300
4.2.1.3	Methoden und Verfahren.....	301
4.2.1.4	Wichtigste Ergebnisse .....	303
	Granulierung.....	303
	Thermische Stabilisierung und Porosierung im Drehrohfen.....	303
	Hydrothermale Erhärtung.....	305
	Eigenschaften der Leichtgranulate .....	305
	Leichtgranulate aus Mauerwerkbruch im Beton .....	307
4.2.1.5	Zielerreichung .....	309
4.2.1.6	Forschungsbedarf .....	310
4.2.1.7	Ressourceneffizienzpotenzial .....	311
4.2.1.8	Ansprechpartner .....	312
4.2.1.9	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens.....	313
4.2.1.10	Quellen .....	316
4.2.2	Celitement – Entwicklung eines nachhaltigen Zementes .....	317
4.2.2.1	Stand zum Vorhabensbeginn.....	317
	Portlandzement.....	317
	Celitement-Prinzip.....	318
4.2.2.2	Ziel des Vorhabens .....	319
4.2.2.3	Methoden und Verfahren.....	321
	Hydrothermalsynthese.....	321
	Aktivierende Mahlung.....	321
	Entsäuern von karbonatischen Rohstoffen .....	322
	Analytik .....	322
4.2.2.4	Wichtigste Ergebnisse .....	323
	Versuchsanlage.....	323
	Rohstoffensäuerung.....	324

	In-situ-Untersuchung des Hydrothermalprozesses .....	324
	Untersuchung der Mikrostruktur .....	324
	Stoff- und Energiebilanzen / Marktchancen.....	326
4.2.2.5	Zielerreichung .....	326
	Bau und Betrieb der Versuchsanlage .....	326
	Stoffliche und energetische Optimierung des Produktionsverfahrens.....	326
	Entwicklung von Spezialanwendungen.....	327
	Vorbereitung Markteintritt .....	327
4.2.2.6	Forschungsbedarf .....	327
4.2.2.7	Ressourceneffizienzpotenzial .....	328
4.2.2.8	Ansprechpartner .....	330
4.2.2.9	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens.....	330
4.2.2.10	Quellen .....	332
4.3	Einordnung in das Forschungsfeld Mineralik und Baustoffe .....	334
4.3.1	Übersicht über die r <sup>2</sup> -Forschungsvorhaben.....	334
4.3.1.1	Entwicklung einer Technologie zur Herstellung hochwertiger Leichtgranulate aus sekundären Rohstoffen auf Basis von heterogenen Bau- und Abbruchabfällen ....	334
4.3.1.2	Ressourceneffiziente Trocknungstechnologie für Keramikprodukte .....	335
4.3.1.3	Niedrig-Temperatur-Sinterung von Porzellan .....	336
4.3.1.4	Entwicklung einer Pilotanlage für ein neuartiges Nassbindemittel, das Portlandzement ersetzt .....	337
4.3.2	Adressierte Technologien und Forschungsthemen .....	338
4.3.2.1	Bereich Keramik.....	339
4.3.2.2	Baubereich.....	339
4.3.3	Einordnung der Forschungsergebnisse .....	339
4.3.4	Weiterer Forschungsbedarf.....	341
4.3.5	Quellen.....	342
<b>5</b>	<b>Netzwerke und Begleitforschung.....</b>	<b>344</b>
5.1	Netzwerk und internetbasierte Webplattform zur Ressourceneffizienz als Lern- und Anwendungsmittel - RESEFI .....	344
5.1.1	Stand zum Vorhabensbeginn .....	344
5.1.2	Ziel des Vorhabens .....	344
5.1.3	Methoden und Verfahren.....	345
5.1.4	Ergebnisse.....	345
5.1.5	Zielerreichung.....	349
5.1.6	Forschungsbedarf.....	353
5.1.7	Ressourceneffizienzpotenzial .....	354

5.1.8	Ansprechpartner.....	355
5.1.9	Quellen.....	355
5.2	Ergebnisse der $r^2$ -Begleitforschung: Potenziale von Innovationen in rohstoffintensiven Produktionsprozessen .....	356
5.2.1	Einleitung.....	356
5.2.2	Abschätzung der ökologischen und direkten ökonomischen Effekte der BMBF-Fördermaßnahme $r^2$ .....	358
5.2.2.1	Vorgehensweise zur ökologischen und ökonomischen Bewertung.....	358
5.2.2.2	Synopse der Einsparpotenziale für die Fördermaßnahme $r^2$ .....	360
5.2.2.3	Diskussion des Einsparpotenzials beim kumulierten Materialaufwand .....	362
5.2.2.4	Diskussion des Einsparpotenzials beim Primärenergiebedarf.....	362
5.2.2.5	Diskussion des Einsparpotenzials bei Treibhausgasemissionen.....	363
5.2.2.6	Diskussion des ökonomischen Einsparpotenzials .....	363
5.2.3	Potenzieller Beitrag der BMBF-Fördermaßnahme $r^2$ zur Rohstoffproduktivität.....	363
5.2.3.1	Rohstoffproduktivität mit Rohstoffäquivalenten.....	364
5.2.3.2	Potenzieller Beitrag der unter $r^2$ geförderten Technologien („ohne Rucksack“).....	365
5.2.3.3	Potenzieller Beitrag der unter $r^2$ geförderten Technologien („mit Rucksack“).....	366
5.2.4	Gesamtwirtschaftliche Effekte der Ausschöpfung des Ressourceneffizienzpotenzials.....	368
5.2.4.1	Methode zur Abschätzung gesamtwirtschaftlicher Potenziale von $r^2$ .....	368
5.2.4.2	Ergebnisse auf gesamtwirtschaftlicher Ebene .....	369
5.2.4.3	Strukturelle Effekte .....	371
5.2.4.4	Rebound-Effekt .....	371
5.2.5	Meta-Roadmap zur Identifizierung branchenübergreifender Kreislaufschließungen der $r^2$ -Verbundprojekte .....	373
5.2.5.1	Brancheninterne Kreislaufführung .....	374
5.2.5.2	Branchenübergreifende Kreislaufschließung .....	375
5.2.6	Vernetzungspotenziale rohstoffintensiver Wertschöpfungsketten .....	378
5.2.6.1	Eisen- und Stahlindustrie.....	378
5.2.6.2	Aluminiumindustrie.....	379
5.2.6.3	Bauindustrie.....	380
5.2.6.4	Synopse der Vernetzungspotenziale.....	380
5.2.7	Reflexionen zum Prozess der Begleitforschung in $r^2$ .....	381
5.2.7.1	Arbeitsweise der Begleitforschung.....	382
5.2.7.2	Information und Ergebnisverwertung.....	383
5.2.7.3	Vernetzung der Verbände.....	385
5.2.7.4	Fachliche Unterstützung der Verbände .....	386

5.2.8	Zusammenfassung und Ausblick .....	387
5.2.9	Ansprechpartner.....	388
5.2.10	Veröffentlichungen des Verbundforschungsvorhabens.....	389
5.2.11	Quellen.....	390
5.3	Einordnung in das Forschungsfeld Ressourceneffizienz.....	395
5.3.1	Megatonnen statt Nanogramm.....	395
5.3.2	Life Cycle Thinking.....	396
5.3.3	Notwendigkeit einer ökologischen Bewertung.....	398
5.3.4	„Gewürzmetalle“ – zurück zu den Milligramm.....	399
5.3.5	Gesamtwirtschaftliches Potenzial .....	399
5.3.6	Betriebswirtschaftliches Potenzial .....	400
5.3.7	Systemeffizienz im Gesamtzusammenhang .....	402
5.3.8	Ausblick.....	403
5.3.9	Quellen.....	405
<b>6</b>	<b>Wege zu einer umweltverträglichen Rohstoffwirtschaft.....</b>	<b>407</b>
6.1	Einleitung.....	407
6.2	Bergrecht, Naturschutz- und Wasserrecht .....	409
6.3	Ökonomische Anreizinstrumente .....	412
6.3.1	Primärbaustoffsteuer.....	412
6.3.2	Materialinputsteuer.....	413
6.3.3	Emissionshandel .....	413
6.4	Instrumente für die Kreislaufführung von Rohstoffen .....	414
6.4.1	Herstellerorientierte Instrumente .....	415
6.4.2	Verbraucherorientierte Instrumente.....	417
6.5	Internationale Ansätze .....	418
6.5.1	Zertifizierungssysteme.....	418
6.5.2	Rohstoffpartnerschaften.....	420
6.5.3	Internationales Rohstoffrahmenabkommen.....	421
6.6	Ausblick.....	424
6.7	Quellen.....	425
<b>7</b>	<b>Schlagwortverzeichnis.....</b>	<b>433</b>